

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
Факультет інформатики та обчислювальної техніки  
Кафедра автоматики та управління в технічних системах**

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ О.І. Ролік

«\_\_»\_\_\_\_\_2019 р.

**Дипломний проект  
на здобуття ступеня бакалавра  
з напрямку підготовки 6. 050201 «Системна інженерія»  
на тему: «Об'єктно-орієнтоване моделювання електромагнітного  
прискорювача мас»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ІА-52

Фурмак Антон Вікторович \_\_\_\_\_

Керівник:

Старший викладач кафедри АУТС

Яланецький В.А. \_\_\_\_\_

Рецензент: \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цьому дипломному  
проекті немає запозичень з праць інших  
авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2019 рік

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

**Факультет інформатики та обчислювальної техніки**  
**Кафедра автоматики та управління в технічних системах**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Напрямок підготовки – 6. 050201 «Системна інженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ О.І. Ролік

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломний проект студенту**

**Фурмаку Антону Вікторовичу**

1. Тема проекту «Об'єктно-орієнтоване моделювання електромагнітного прискорювача мас», керівник проекту Яланецький Валерій Анатолійович, старший викладач затверджені наказом по університету від «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 р. № \_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом проекту \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до проекту

\_\_\_\_\_

4. Зміст пояснювальної записки

\_\_\_\_\_

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо)

\_\_\_\_\_ -

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

## Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Отримання завдання на дипломний проект та узгодження вихідних даних	14.03.2019	
2	Огляд існуючих рішень та вибір структури системи	19.04.2019	
3	Розробка структурної електричної схеми	26.04.2019	
4	Розробка принципової електричної схеми	10.05.2019	
5	Вибір окремих вузлів та елементів	21.05.2019	
6	Розробка алгоритму програми	06.06.2019	
7	Розробка програмного забезпечення	14.06.2019	
8	Проведення дослідів	18.06.2019	

Студент

А. В. Фурмак

Керівник проекту

В. А. Яланецький

## АНОТАЦІЯ

Фурмак А. В. Об'єктно-орієнтоване моделювання електромагнітного прискорювача мас. КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2019.

Проект містить 82 сторінки пояснювальної записки, 45 рисунків, 11 таблиць, посилання на 15 літературних джерел, 4 конструкторських документи.

Ключові слова: гармата Гауса, електромагнітний прискорювач мас, магнітне поле, метод скінчених елементів, об'єктно орієнтоване програмування.

У рамках розробки даного дипломного проекту була створена електрична схема та розроблено програмне забезпечення для моделювання електромагнітного прискорювача мас солеїдного типу.

Під час створення функціональної схеми були підібрані необхідні радіолелементи: конденсатори, діоди, котушка індуктивності, теристорний ключ та резистори. Під час розробки структурної схеми було визначено зв'язок між усіма елементами та вузлами.

Дана система, попри велику кількість переваг, має один значний недолік, такий як низький ККД. Для використання подібної установки у комерційних цілях необхідні велика ємність конденсаторів, малий супротив котушки та тонке калібрування параметрів системи в залежності від призначення. Наразі дана система знаходиться лише на стадії розробки та не може бути широко застосована.

## SUMMARY

Furmak A. V. Object-oriented modeling of electromagnetic mass accelerator. Igor Sikorsky KPI, Kyiv, 2019.

The project contains 82 pages, 45 figures, 11 tables, links to 15 literary sources, 4 design documents.

Keywords: Gauss gun, electromagnetic mass accelerator, magnetic field, finite element method, object-oriented programming.

In the framework of the development of this diploma project, an electrical circuit was created and a software prognosis for the simulation of a solenoid-type electromagnetic accelerator was developed.

During the creation of the functional scheme, the necessary radio elements were selected: capacitors, diodes, inductor, tester key and resistors. During the development of the structural scheme, the relationship between all elements and nodes was determined.

Despite a large number of advantages, this system has one significant drawback, such as low efficiency. To use such device for commercial purposes, large capacitance capacitors are required, small resistance to the coil and fine calibration of the system parameters depending on the purpose. Currently, this system is only under development and can not be widely applied.

Номер рядку	Формат	Позначення	Найменування	Кількість	Номер	Прим ітка					
1			<u>Документація загальна</u>								
2											
3			Розроблена								
4											
5	A4	IA52.330БАК.005 ПЗ	Пояснювальна записка	8 2							
6											
7	A3	IA52.330БАК.005 Э1	Схема електрична структурна	1							
8	A3	IA52.330БАК.005 Э3	Схема електрична принципова	1							
9	A3	IA52.330БАК.005 Д1	Алгоритм	1							
10	A3	IA52.330БАК.005 Д2	Інтерфейс користувача	1							
11											
12											
13											
14											
15											
16											
17											
18											
19											
20											
21											
22											
23											
24											
25											
26											
27											
Зм	Арк	№ докум.					Підпис	Дата			
Розроб.	Фурмак А.В.								Літер.	Аркуш	Аркушів
Перевір.	Яланецький В. А.								Т	І	І
Н.контр.											
Затв.											

**Пояснювальна записка  
до дипломного проекту  
на тему: «Об'єктно-орієнтоване моделювання  
електромагнітного прискорювача мас»**

Київ – 2019 рік

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ ТЕРМІНІВ .....	4
ВСТУП .....	11
1 ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ОБЛАСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ОБ’ЄКТУ МОДЕЛЮВАННЯ .....	13
2 ОПИС ОБ’ЄКТУ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ .....	15
2.1 Опис принципу дії об’єкта моделювання .....	15
2.2 Огляд існуючих рішень .....	18
2.2.1 Гармата Гауса .....	18
2.2.2 Космічна гармата .....	20
2.2.3 Рейкотрон .....	22
3 РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СТРУКТУРНОЇ .....	26
4 РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ .....	27
5 ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ОКРЕМИХ ВУЗЛІВ ТА ЕЛЕМЕНТІВ ....	29
5.1 Тиристорний ключ .....	29
5.2 Діод .....	31
5.3 Конденсатори .....	34
5.4 Резистори .....	35
5.5 Елемент живлення .....	37
5.6 Понижуючий конвертер .....	38
5.7 Кнопка-тумблер .....	39

					ІА52.330БАК.005.ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата				
Розроб.		Фурмак А.В.			Об’єктно-орієнтоване моделювання електромагнітного прискорювача мас. Пояснювальна записка	Літера	Аркуш	Архивів
Перевір.		Яланецький В.А.				Т		63
						КПІ ім.Ігоря Сікорського ФІОТ Група ІА-52		
Т.контр.								
Затвер.								



5.8 Лампа розжарювання .....	39
6 ПОБУДОВА АЛГОРИТМУ РОБОТИ ПРОГРАМИ .....	41
7 МЕТОД ПРОВЕДЕННЯ РОЗРАХУНКІВ .....	44
8 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ .....	46
8.1 Програма FEMM 4.2 .....	46
8.2 Інтерфейс розробленого програмного забезпечення .....	47
8.3 Код розробленої програми .....	52
9 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	55
9.1 Дослід перший .....	55
9.2 Дослід другий .....	60
9.3 Дослід третій .....	63
ВИСНОВОК.....	67
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ .....	68
ДОДАТОК А.....	70
ДОДАТОК Б .....	80
ДОДАТОК В .....	81

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ ТЕРМІНІВ

ДВЗ – Двигун внутрішнього згорання

ЕОМ – Електронна обчислювальна машина

ЕПМ – Електромагнітний прискорювач мас

ККД – Коефіцієнт корисної дії

МСЕ – Метод скінчених елементів

ТРД – Турбореактивний двигун

					ІА52.320БАК.005 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

## ВСТУП

Теперішній світ абсолютно неможливо уявити без сучасних технологій. Багато приладів, які ми використовуємо щодня, є надскладними технологічними виробами, задля володіння якими людство витратило сотні тисяч років. Щоденно люди використовують сотні мегават електричної енергії задля своїх потреб: їздимо в транспорті, користуємося комп'ютером, заряджаємо телефони, транспортуємо різні вантажі по всьому світу тощо.

В даному дипломному проєкті досліджена проблема транспортування вантажів за допомогою енергії магнітного поля та проведено моделювання електромагнітного прискорювач мас (гармати Гауса).

Вперше поняття електромагнітної гармати ввели російські інженери Ямпольський та Подільський у 1915 році. Для її створення вони використали принцип лінійного електродвигуна, що був винайдений фізиком Борисом Якобі ще у XIX ст. Ці двоє вчених створили магнітно-фугальну гармату, яка має ствол довжиною 50 метрів, що оповитий котушками індуктивності. Планувалося, що розігнаний за допомогою електроструму снаряд відлетить на 300 км та матиме початкову швидкість 915 м/с. Проте проєкт закрили як несвоєчасний та нові експерименти з такими системами були продовжені вже після Другої світової війни.

На сьогоднішній день ведуться активні розробки подібних гармат. Наприклад, в одному з американських науково-дослідницьких центрів розробляється проєкт, метою якого є відправка в космос контейнерів з радіоактивними відходами за допомогою «стрільб». Для реалізації цього задуму вже було побудовано кілька технічних і пускових майданчиків, приміщень для підготовки снарядів-контейнерів, підземних сховищ, центр управління «стрільбами», станції радіолокаційного стеження.

Електромагнітні прискорювачі мас або гармати Гауса – ефективна заміна сучасної зброї, а також дешевий спосіб запуску супутників на навколоземну орбіту.

~~Гармата Гауса має переваги, яких не мають інші види стрілецької~~

					IA52.330BAK.005 ПЗ	Лист
	зброя:					
Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

- відсутність гільз;
- необмеженість у виборі початкової швидкості й енергії боєприпасу;
- швидкострільність;
- можливість безшумного пострілу (якщо швидкість снаряда не перевищує швидкості звуку);
- відносно невелика віддача, адже у імпульс йде тільки власна кінетична енергія снаряду, а не порохових газів;
- більша надійність та зносостійкість;
- наявність безпорохового патрону, що дозволяє зменшити масу боєзапасу та абсолютно викреслює можливість детонування боєзапасу при попаданні в нього;
  - можливість роботи в будь-яких умовах, зокрема в умовах космічного простору.

Попри уявну простоту гармати Гауса та її переваги, застосування її як зброї пов'язане з серйозними труднощами, що будуть описані далі. Перспективи можливі лише в майбутньому, якщо будуть створені компактні і потужні джерела електричного струму та високотемпературні надпровідники (200 – 300К).

Метою даного проекту є дослідження можливостей електромагнітного прискорювача мас, створення власного прототипу, визначення ефективності прискорювача та кінетичної енергії снаряда, визначення способів збільшення ККД.

Бакалаврський проект складається з наступних розділів: вступ, 9 основних розділів, висновки, список використаних джерел з 15 найменувань. Графічна частина включає 4 кресленики формату А3. Загальний обсяг 81 сторінка.

					IA52.330БАК.005 ПЗ	Лист
Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1 ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ОБЛАСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ОБ'ЄКТУ МОДЕЛЮВАННЯ

В наш час область транспортування вантажу є невід'ємною частиною функціонування нашого суспільства: авто- та залізничний транспорт, літаки та дрони. Цей транспорт функціонує за допомогою різного типу двигунів: ДВЗ, ТРД, електродвигуни постійного та змінного струмів, різноманітні лінійні двигуни, які є підвидом електромагнітних прискорювачів мас. Як можна бачити, електротранспорт зараз набуває популярності через його екологічність, надійність та досить високий ККД.

З розвитком технологій можливості людства збільшуються, що дозволяє мати великий простір для винахідництва у сфері електромагнітних двигунів та електромагнітних прискорювачів мас. Недарма перші автомобілі були електричними, а перший світовий рекорд швидкості був поставлений саме на електрокарі.

Також сьогодні вже важко уявити наше життя без детального дослідження космосу або без використання різного типу зброї та військової техніки. В усіх цих сферах вже також ведуться активні розробки з використанням електромагнітного прискорювача мас.

За допомогою даного об'єкту моделювання можна буде дослідити роботу електромагнітного прискорювача мас соленоїдного типу, що в майбутньому призначатиметься для задоволення потреб різних сфер.

Область застосування даного приладу є безмежною: від дослідження та вивчення електромагнітних властивостей матеріалів до доставки вантажу на орбіту (запуск космічних супутників стане дешевшим через зменшення використання ракетного палива та зникнення потреби використання багатоступеневих ракет носіїв) та безпорохової зброї, що має ряд переваг над пороховою, описаних у вступі.

Зокрема, рейковий ЕПМ застосовується для будівництва залізничного полотна під високошвидкісні поїзди. Тут пересувається не снаряд (рейки), а сама установка (поїзд). Даний метод переміщення поїздів дуже ефективний

тому що не зношуються рейки і колеса поїзда, через відсутність сили тертя

					Лист
Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	

досягається велика швидкість, відсутній шумовий фон. Перед входженням на рейки, потягу намагаються надати якомога більшу першопочаткову швидкість.

Але цей метод має ряд недоліків, таких як:

- велика вартість споруди;
- слабкість сучасних електромагнітів;
- недосконалість матеріалів і приладів на даний момент.

Проте можна точно стверджувати, що наразі електромагнітний прискорювач має більше недоліків, ніж переваг, тому малоймовірно, що в найближчі роки людство сильно наблизиться до створення ідеального варіанту такої зброї, катапульти або іншого способу переміщення об'єктів.

					ІА52.330БАК.005 ПЗ	Лист
Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2 ОПИС ОБ'ЄКТУ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

### 2.1 Опис принципу дії об'єкта моделювання

Як ми знаємо, в просторі навколо нерухомих електричних зарядів існує електростатичне поле, а в просторі навколо рухомих зарядів (як і навколо змінних в часі електричних полів) існує магнітне поле.

Саме завдяки магнітному полю і взаємодіють між собою електричні струми, постійні магніти, а також струми з магнітами. У порівнянні з електричною взаємодією, магнітна взаємодія є значно сильнішою. Цю взаємодію свого часу вивчав Андре-Марі Ампер.

У фізиці характеристикою магнітного поля є магнітна індукція  $B$ , і чим вона більше, тим сильніше магнітне поле. Магнітна індукція  $B$  – величина векторна, її напрямок збігається з напрямком сили, що діє на північний полюс умовної магнітної стрілки, яку помістили в якусь точку магнітного поля. Магнітне поле зорієнтує магнітну стрілку в напрямку вектора  $B$ , тобто в напрямку магнітного поля.

Вектор  $B$  в кожній точці лінії магнітної індукції направлений до неї по дотичній. Тобто індукція  $B$  характеризує силову дію магнітного поля на струм. Схожу роль відіграє напруженість  $E$  для електричного поля, що характеризує силову дію електричного поля на заряд.

Найпростіший експеримент із залізною тирсою дозволяє наочно продемонструвати явище дії магнітного поля на намагнічений об'єкт, оскільки в постійному магнітному полі маленькі шматочки феромагнетика (такими шматочками є залізні ошурки) стають, намагнічуючись по полю, немов маленькими стрілками компаса (рисунок 1).

Як можна бачити, на відміну від ліній напруженості електростатичного поля, які в просторі розімкнуті, лінії магнітної індукції, що оточують електричний струм, замкнуті. Якщо лінії електричної напруженості  $E$  починаються на позитивних зарядах і закінчуються на

					Лист
Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	

IA52.330БАК.005 ПЗ

негативних, то лінії магнітної індукції  $B$  просто замкнуті навколо струму, що їх породжує.

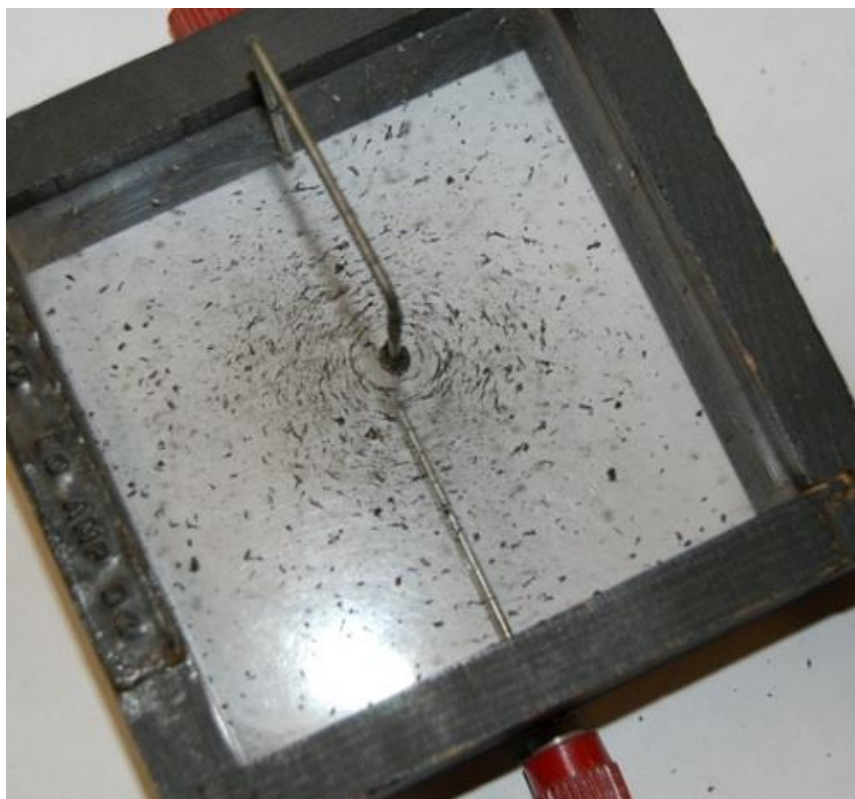


Рисунок 1 – Візуалізація ліній магнітної індукції

Якщо замість прямого провідника зі струмом розглянути виток зі струмом, а всередині витка розмістити компас з магнітною стрілкою, то магнітна стрілка встановиться у напрямку ліній магнітної індукції – вони виявляться спрямованими по осі витка (рисунок 2).

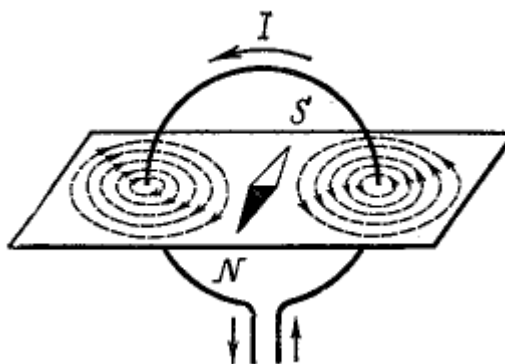


Рисунок 2 - Лінії магнітної індукції одного витка зі струмом



Якщо безліч витків зі струмом утворюють довгу котушку – соленоїд (тобто довжина котушки набагато перевищує її діаметр), то магнітне поле всередині неї є однорідним, тобто лінії магнітної індукції  $B$  паралельні один одному і мають однакову щільність по всій довжині котушки (рисунок 3).

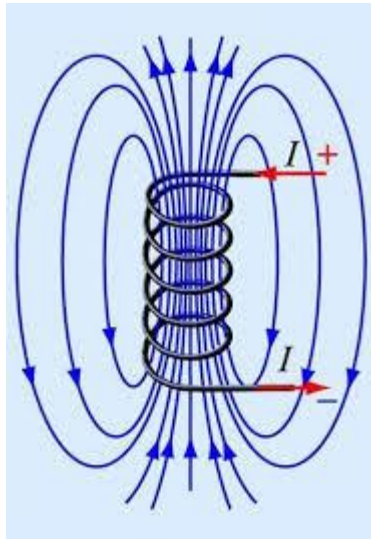


Рисунок 3 – Лінії магнітної індукції соленоїда

Тобто у середині котушки створюється сильне магнітне поле, яке залежить не тільки від струму, а й від його сили і від напрямку.

Гармата Гауса складається з соленоїда, у котрого довжина котушки набагато більша її діаметру. Всередині соленоїда знаходиться ствол з діелектрика, в один з кінців якого вставляється снаряд, що виконаний з феромагнетика. При протіканні електричного струму в соленоїді виникає електромагнітне поле, що розганяє снаряд і всмоктує його всередину соленоїда. При цьому на кінцях снаряда утворюються полюси, які є орієнтованими згідно полюсів котушки. Завдяки цьому після проходження центру соленоїда снаряд притягується в зворотному напрямку, тобто гальмується.

Таким чином, при правильному підборі матеріалів та параметрів можна отримати непогані результати. Задля досягнення максимальної ефективності, імпульс має бути потужним і коротким.

Цього можна досягти за допомогою конденсаторів, які будуть

розряджатися одномоментно на котушку. За допомогою постійної часу $R \cdot C$					Лист
1A52.330BAK.005 ПЗ					
Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	

можна приблизно дізнатися довжину імпульсу, таким чином підбираючи потрібну ємність та діаметр дроту.

Аналізуючи всі ці дані, було розроблено об'єкт моделювання, що буде працювати наступним чином:

- 1) Спочатку через загальну мережу 220В буде йти заряд конденсаторів на подвоювачі напруги через навантаження у вигляді лампи 70 Вт та резистора 200 Ом;
- 2) Коли лампа повністю погасне, це стане сигналом, що конденсатори зарядились та їх реактивний супротив наближається до нескінченності. Потрібно відключити конденсатори від мережі.
- 3) На управління тиристорного ключа подається позитивна напруга для розрядки конденсаторів на котушку. Таким чином на малий проміжок часу всередині котушки створюється потужне магнітне поле яке і розганяє феромагнетик, який лежить у стволі.

## 2.2 Огляд існуючих рішень

На сьогоднішній день ведуться активні роботи з використанням електромагнітного прискорювача мас для різного типу винаходів, проте повним успіхом жодна з них не закінчилась, так як науковці стикаються з великою кількістю перешкод, про які буде описано далі.

### 2.2.1 Гармата Гауса

Гармата Гауса є одним з різновидів ЕПМ. Прилад складається з соленоїда, всередині якого розміщено ствол з діелектрика. В один з кінців ствола вставляється снаряд, що виготовлений з феромагнетика. Під час проходження електричного струму в соленоїді виникає магнітне поле, що прискорює снаряд, на кінцях якого при цьому утворюються полюси, які є симетричними полюсам котушки. Через це снаряд гальмується після проходження через центр соленоїда.

					ІА52.330БАК.005 ПЗ	Лист
Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Для досягнення максимального ефекту імпульс струму в соленоїді має бути короткочасним і потужним. Зазвичай для отримання такого імпульсу застосовуються електричні конденсатори з високою робочою напругою.

Параметри обмотки, снаряда і конденсаторів мають бути узгоджені таким чином, щоб під час пострілу до моменту підльоту снаряда до середини обмотки струм в ній вже зменшувався до мінімального значення, тобто, заряд конденсаторів має бути вже повністю витраченим. У такому випадку ККД гармати Гауса буде максимальним.

Снарядні ЕМП діляться на два типи: використовують в якості снаряда диск і використовують в якості снаряда кулю або інший феромагнетик. Дисківі електромагнітні прискорювачі мають вищу дальність польоту снаряда і його швидкість, але під час польоту диск мнеться, і при розгоні диска до надвисоких швидкостей, він плавиться через невелику товщину. Прискорювачі з використанням снарядів набагато надійніші і форма снарядів дозволяє отримати швидкість понад 10 км/с.

Труднощі використання гармати Гауса наступні:

- низький ККД установки. Лише 1-7% заряду конденсаторів перетворюються на кінетичну енергію снаряду. Частково цей недолік можна компенсувати за допомогою застосування багатокрокової системи розгону снаряда, але в будь-якому випадку ККД рідко досягає навіть 27%. Тому гармата Гауса за силою пострілу програє навіть пневматичній зброї;
- великі витрати енергії завдяки низькому ККД та досить довгий час перезаряджання конденсаторів, що змушує разом із самою гарматою Гауса мати джерело живлення (як правило, потужну акумуляторну батарею). Можна значно збільшити ефективність, якщо використовувати надпровідні соленоїди, проте це потребує потужної системи охолодження, що значно зменшує мобільність гармати Гауса;
- велика вага й габарити установки при її низькій ефективності.

Для збільшення ККД снарядного ЕМУМ і швидкості вильоту снаряда можливі наступний модифікації:

					IA52.330БАК.005 ПЗ	Лист
Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

- 1) Застосування снарядів овальної форми або у формі кулі. Снаряди такої форми мають менше тертя повітря через обтичну форму, отже збільшується дальність польоту і швидкість кулі;
- 2) Зміна діаметра дроту, що використовується в соленоїді. Найбільш високий ККД має соленоїд, намотаний тонким проводом в багато витків, з великим діаметром і великою масою сердечника (або снаряда). При такому способі виготовлення ЕПМ, снаряд володіє великою масою і низькою швидкістю польоту, незважаючи на істотну кінетичну енергію.
- 3) Інший варіант – обмотка малого діаметра з товстого дроту в кілька витків і сердечник розміром з обрізок голки. ККД такої установки надзвичайно низький, зате голка при пострілі набуває величезну швидкість.
- 4) Збільшення кількості ступенів розгону. Із застосуванням більшого числа ступенів розгону снаряда, швидкість вильоту снаряда збільшується в багато разів. Так, наприклад, два ступені розгону передають снаряду в два рази більше енергії, ніж одна.

### 2.2.2 Космічна гармата

Космічна гармата – метод доставки об'єкта в космос з вогнепальної зброї, такої як гігантська гармата або електромагнітна гармата. Відноситься до безракетного способу розміщення об'єктів на орбіті.

Раніше в рамках проекту з дослідження висоти ВМС США була створена 16-дюймова гармата, що мала довжину ствола 40 м та мала невибухові снаряди вагою 180 кг, що взлітали на максимальну висоту 180 км при початковій швидкості 3600 м/с. Тобто теоретично ця зброя дозволяє снаряду виконувати суборбітальний космічний політ.

Однак ніколи ще жодна космічна гармата не змогла вивести об'єкт на орбіту. Сама космічна гармата не може переміщати об'єкт на стаціонарну орбіту навколо планети без коригування курсу об'єкта після запуску.

					IA52.330БАК.005 ПЗ	Лист
Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

оскільки гармата – це точка траєкторії, а орбіта є замкнутою траєкторією. Таким чином, снаряд повинен бути трохи схожий на ракету.

Великі навантаження, що впливають на снаряд, означають, що високоймовірно космічна гармата не зможе безпечно «доставити» людину або тендітні вантажі на орбіту, а обмежиться доставкою більш міцних товарів або супутників. Винятком є електромагнітні гармати, де час прискорення теоретично не обмежений, а відступність ствола не створює надзвичайно високого опору повітря.

Опір атмосфери створює додаткові труднощі в управлінні польотом вже випущеного снаряда. Якщо ствол гармати досягає останніх рівнів стратосфери, де повітря менш щільне, ці проблеми частково вирішуються.

Сама космічна гармата не може розмістити об'єкт на фіксованій траєкторії навколо Землі. Закон тяжіння не допускає стабільної траєкторії без активного навантаження, що виконує коригування польоту після запуску. Траєкторія може бути параболічної, гіперболічної (коли швидкість руху досягає або перевищує другу космічну швидкість) або еліптичної (швидкість досягає першої космічної швидкості) форми.

Остання закінчується на поверхні планети в початковій точці або в іншій точці, беручи до уваги обертання планети і опір атмосфери. Це означає, що невідкорегована балістична траєкторія завжди падає на планету, пройшовши один виток, якщо вона запускається з першою космічною швидкістю. На другій космічній швидкості снаряд обертається навколо орбіти Сонця, що пересікається з орбітою Землі. Однак орбіта Сонця може змінитися через збурення інших планет і не перетинатись з орбітою Землі. У кожному разі орбіти Землі і снаряда різні, що призводить до усунення моменту зіткнення снаряду і Землі.

Корисне навантаження, що призначене для замкнутої орбіти, дозволить курсу адаптуватися до нової орбіти, яка не перетинає поверхню планети. Крім того, ракета може бути використана для додаткової зміни висоти, як заплановано в проєкті «Quicklaunch».

Можливо, що у гравітаційній системі декількох тіл, якою є система

					Лист
	Земля-Місяць, можуть бути	траєкторії, які не перетинають	поверхню Землі		
Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	

але ці шляхи, ймовірно, не дуже легкі та вимагають набагато більшої кількості енергії.

### 2.2.3 Рейкотрон

Рейкотрон – це електромагнітний прискорювач мас, який прискорює струмопровідний снаряд вздовж двох металевих напрямних за допомогою використання сили Лоренца.

Термін «рейкотрон» був запропонований в кінці 1950-х років радянським академіком Львом Арцимовичем, щоб замінити громіздку назву «електродинамічний прискорювач мас», яка тоді існувала. Причиною розробки таких пристроїв, які є перспективною зброєю, є те, що використання пороху, на думку експертів, досягло своїх меж – швидкість випущеного таким чином заряду обмежена і становить 2,5 км/с.

Тому було вигадано пристрій, який складається з двох паралельних рейок (електродів). Ці електроди підключені до потужного джерела постійного струму. Між рейками знаходиться електропровідна маса, що буде розганятись. Вона замикає електричне коло та завдяки дії сили Ампера набуває прискорення. Сила Ампера діє на замкнений провідник зі струмом у його власному магнітному полі. Також ця сила діє і на самі рейки, завдяки чому вони взаємно відштовхуються.

Принцип дії всіх сил на їх напрямок зображено на рисунку 4.

					IA52.330БАК.005 ПЗ	Лист
Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

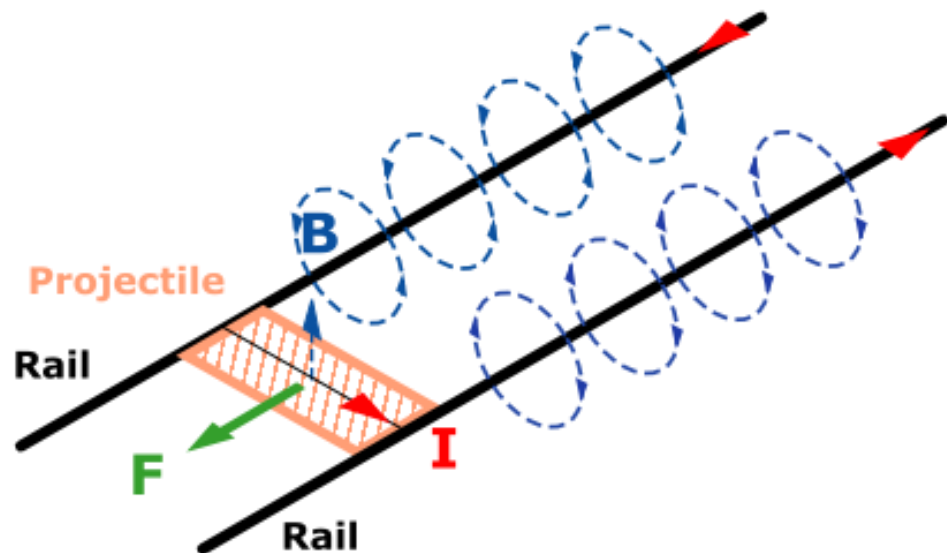


Рисунок 4 – Принцип дії сил в рейкотроні

З виготовленням даного приладу виникає ряд таких проблем: імпульс струму має бути дуже потужним та різким для того щоб снаряд не зміг розлетітись на шматки. Але при цьому має виникнути прискорення, яке штовхатиме снаряд уперед. Так як на снаряд діє сила Ампера, в даному випадку сила струму є важливою складовою задля досягнення необхідної індукції магнітного поля, а також є важливим сам струм, що протікає через снаряд перпендикулярно до силових ліній магнітної індукції.

Матеріал, з якого виготовлено снаряд, та самі рейки повинні мати якомога більшу провідність, снаряд має мати малу масу, а джерело струму має бути якомога найбільшої потужності та мати малу індуктивність. При виконанні цих умов запустити снаряд вийде якомога ефективніше.

Особливістю рейкотрона є те, що він здатен розганяти речі, які мають дуже малу масу, до надвеликих швидкостей.

Зазвичай рейки виготовляють з безкисневої міді, яка покрита сріблом, а в якості снарядів використовують бруски або дріт з алюмінію. В якості джерела живлення використовують батарею конденсаторів, що заряджається від генераторів та різних інших джерел живлення, що мають високу робочу напругу.

Перед входженням на рейки, снаряду намагаються надати якомога

більшу першопочаткову швидкість, для чого використовують пневматичну

4452-330БАК-005-ПЗ					Лист
Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	

або вогнестрільну зброю. У тих рейкотронах, де в якості снаряду використовують провідникове середовище, він згорає після подачі напруги на рейки. Таким чином, він перетворюється у плазму, що проводить струм, і також далі розганяється. Тобто рейкотрон може стріляти плазмою, проте вона швидко розпадеться у зв'язку з її нестійкістю. Проте рух плазми є точнішим за рух звичайного снаряду.

При використанні в таких гарматах непровідних снарядів, снаряд поміщається між рейками. Ззаду нього певним способом запалюється дуговий розряд між рейками, і тіло починає прискорюватися вздовж рейок. Механізм прискорення в цьому випадку відрізняється від вищевикладеного: сила Ампера притискає розряд до задньої частини тіла, яке інтенсивно випаровується та утворює реактивний струмінь, під дією якого і відбувається основне прискорення тіла.

Перевагами та недоліками такого приладу є:

- використання рейкотрона виключає можливість зберігання боєзапасів у вигляді звичайних знарядів;
- порівняно невеликі розміри снарядів дозволяють збільшити кількість боєзапасів.
- розмір системи є досить великим;
- дальність ефективної стрільби рейкотрона досягає 200 км;
- висока швидкість снаряду дозволяє використовувати пристрій в якості засобу повітряної оборони;
- за багато років досліджень не було знайдено ніяких доказів ефективності приладу, особливо в рамках точності та руйнівної сили;
- руйнівна сила (сила пробиття) не перевищує показів артилерії середніх калібрів;
- резонансні явища в рейковій системі;
- необхідність охолодження ствола, блоків електроніки та інших елементів;
- необхідність швидкого перезаряджання гармати для того, щоб збільшити

		темп стрільби;			IA52.330БАК.005 ПЗ	Лист
Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



- вартість одного вистрілу з рейкотрона значно нижча вартості аналогічної по дальності ракети: 25 тис. доларів проти 1 млн доларів відповідно.

Аналізуючи всю інформацію, можна стверджувати, що в цілому електромагнітні прискорювачі мас знайдуть застосування в майбутньому, через 10-20 років, а поки людство ще не володіє достатньо потужними конденсаторами і переносними джерелами енергії, щоб застосовувати мобільний прискорювач. Однак у нас є можливість встановлювати подібне озброєння на танки і кораблі. В таких умовах можна домогтися граничної точності і надвисоких швидкостей польоту снаряда.

					IA52.330БАК.005 ПЗ	Лист
Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3 РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СТРУКТУРНОЇ

У дипломному проекті була розроблена схема електрична структурна, що представлена на кресленні ІА52.330БАК.005 Э1 та на рисунку 5. На ньому зображена загальна структура об'єкту моделювання, а саме всі елементи та їх з'єднання.

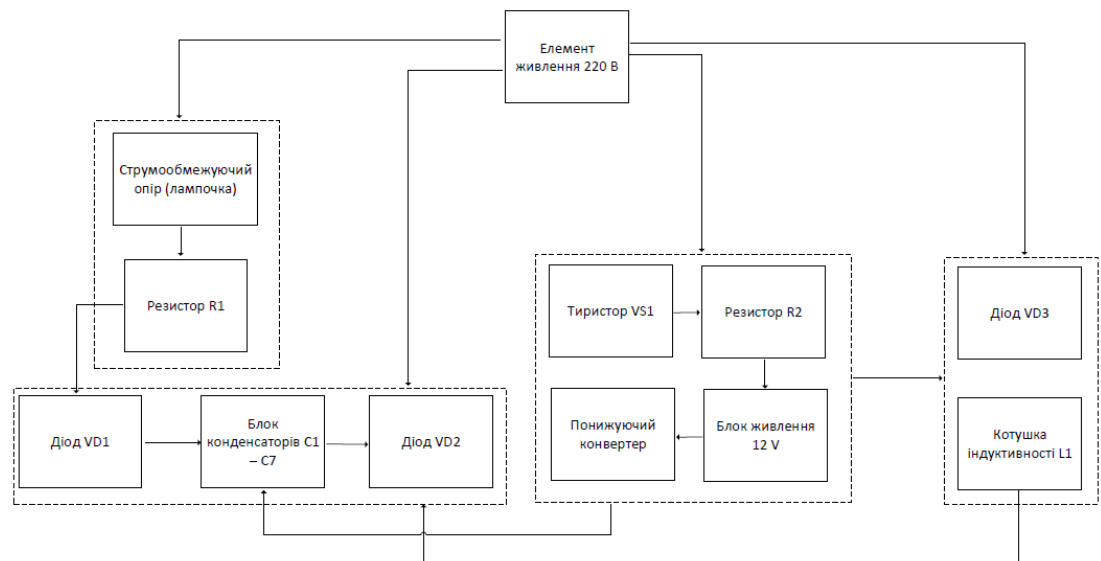


Рисунок 5 – Схема електрична структурна

За допомогою різноманітних графічних елементів (прямокутників, стрілок тощо) на схемі зображені всі основні елементи системи та їх взаємозв'язок. Це все дає широке уявлення про послідовність з'єднання елементів та роботи схеми в цілому.

Для зручності всі блоки згруповані у 4 сегменти. У кожному сегменті блоки взаємодіють між собою, а також всі сегменти мають зв'язок один з одним. Всі елементи під'єднані до джерела живлення 220 В.

Перший сегмент складається з двох елементів, другий – з 9 елементів, третій – з 4 елементів, та четвертий – з 2 елементів.

#### 4 РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ

У дипломному проекті була розроблена схема електрична принципова електромагнітного прискорювача мас, що представлена на кресленні ІА52.330БАК.005 ЭЗ та на рисунку 6.

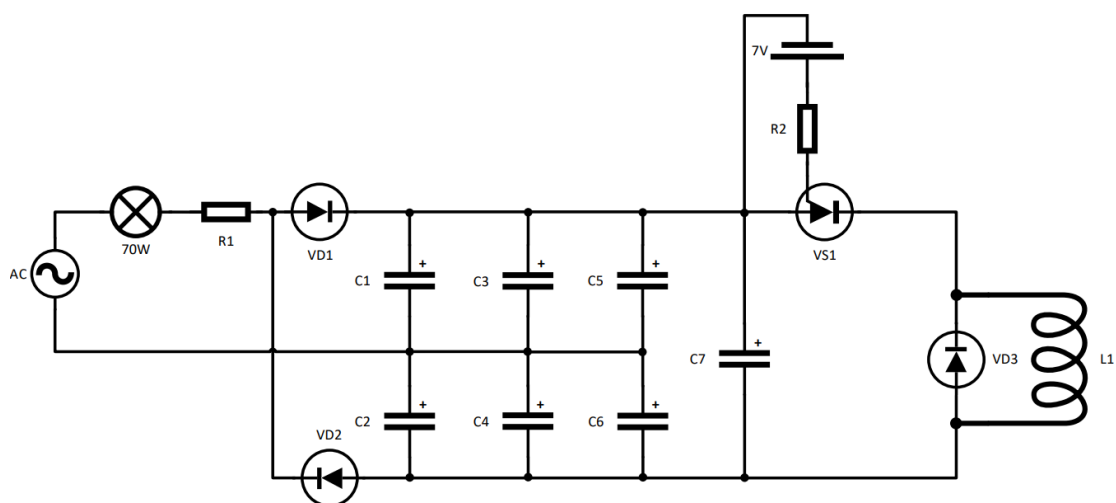


Рисунок 6 – Схема електрична принципова

Побудована схема складається з наступних елементів, що розміщені в такому порядку:

- 1) Спочатку на схемі зображене джерело живлення. В даному випадку це є розетка з напругою 220 В;
- 2) Далі йде ключ, який використовується для зарядки конденсаторів;
- 3) Третій елемент на схемі – це струмообмежуючий опір. Для його створення була використана звичайна лампочка;
- 4) Далі розміщено блок конденсаторів, який утворює множник напруги (напруга збільшується у два рази і теж використовується для зарядки);
- 5) До та перед блоком конденсаторів розміщено по два діоди з кожної сторони;
- 6) Після цього знову розміщено ключ, який використовується безпосередньо для стрільби. Його роль буде виконувати незапираючий тиристор;

7) Шостим елементом схеми є котушка індуктивності зі струмообмежуючим резистором.

8) Останнім елементом є діод.

Умовні позначення елементів на схемі електричній принциповій, їх назви та характеристики:

- Резистори: R1, R2 – 200 Ом, 0,25 Вт;
- Діоди: VD1, VD2, VD3 – IN5408;
- Конденсатори: C1, C2, C5, C6 – 200 В, 680 мкФ;
- Конденсатори: C3, C4 – 200 В, 470 мкФ;
- Конденсатор: C7 – 400 В, 330 мкФ;
- Тиристор: VS1 – КУ202М;
- Котушка індуктивності: L1 – 0,015 мГн;
- Елемент живлення на 7 В;
- Мережа 220 В: АС.

					ІА52.330БАК.005 ПЗ	Лист
Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

## 5 ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ОКРЕМИХ ВУЗЛІВ ТА ЕЛЕМЕНТІВ

В даному розділі наведені всі радіоелементи, які були обрані для побудови фізичної моделі електромагнітного прискорювача мас, та їх характеристики. Всі елементи орієнтовані на роботу з великим імпульсним струмом та напругою, як того потребує установка.

### 5.1 Тиристорний ключ

Електронні ключі у схемах мають різні принципи дії, проте для керування одиничним, але потужним імпульсом струму потрібно обрати надійний ключ. Для цих цілей був обраний кремнієвий, планарно-дифузійний, структури р-п-р-п, тріодний, незапираючий тиристор КУ202М, який зображено на рисунку 8. Номінальні розміри зображені на рисунку 5. Його головною перевагою є можливість пропускати високий імпульсний струм, а також витримувати високу напругу.

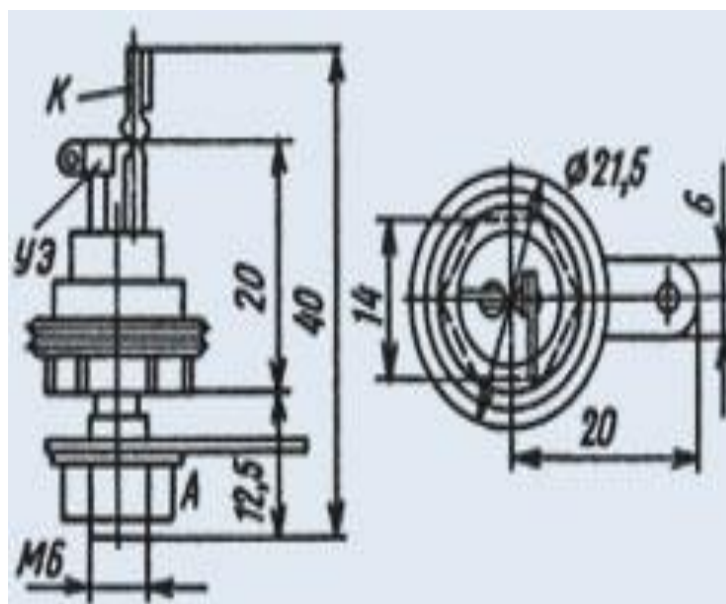


Рисунок 7 – Номінальні розміри тиристора КУ202М



Рисунок 8 – Зовнішній вигляд тиристора

Щоб зрозуміти як працює тиристор треба поглянути на його вольт-амперну характеристику, що зображена на рисунку 9.



Рисунок 9 – Вольт-амперна характеристика тиристора

На анод тиристора подали невелику позитивну напругу. Емітерні переходи увімкнені в прямому напрямі, а колекторні – у зворотньому. По суті уся напруга буде на ньому.

Відрізок від нуля до одиниці буде приблизно схожий з зворотнім графіком характеристики діоду, цей режим є режимом закритого стану тиристора. При збільшенні анодної напруги відбувається інжекція основних

носіїв заряду до області баз, а також відбувається накопичення електронів та дірок, тобто на колекторному переході з'являється різниця потенціалів.

При збільшенні проходження струму через тиристор, напруга на колекторному переході почне зменшуватися. Коли вона зменшиться до певного значення, тиристор перейде в стан негативного диференційного супротиву (область 1-2).

Після цього усі три переходи будуть зміщені у прямому напрямку, тобто тиристор буде у відкритому стані (область 2-3). У відкритому стані тиристор перебуватиме до тих пір, поки колекторний перехід буде зміщений в прямому напрямку. Якщо ж струм тиристора зменшити, то в результаті рекомбінації зменшиться кількість нерівноважних носіїв в базових областях і колекторний перехід виявиться зміщений у зворотному напрямку, тиристор перейде в закритий стан.

При зворотному включенні тиристора вольт-амперна характеристика буде аналогічною як і у двох послідовно включених діодів.

Основні технічні характеристики приладу наведені у таблиці 6.1.

Таблиця 1 – Технічні характеристики тиристора

Характеристика	Значення
Постійна напруга в закритому стані	400 В
Напруга управління	10 В
Постійний струм в відкритому стані	10 А
Імпульсний струм у відкритому стані ( $t < 10$ мс, $I_{вс,ср} < 5$ А)	30 А
Імпульсний струм у відкритому стані при одиничному імпульсі ( $t < 50$ мкс, $f < 50$ Гц)	50 А
Прямий імпульсний струм управління ( $t < 50$ мкс)	500 мА
Середня потужність розсіювання ( $T < 70$ °С)	20 Вт
Час включення	10 мкс

## 5.2 Діод

Діод – це напівпровідниковий прилад з одним р-п переходом, що має два виходи (анод і катод), і призначений для випрямлення, детектування, стабілізації, модуляції, обмеження і перетворення електричних сигналів.

У колі грає роль компонента множника напруги, який складається з двох конденсаторів та двох діодів.

Для розробки був обраний діод IN5408 у корпусі DO201AD через гарні імпульсні характеристики та наявності у мене.

Його зовнішній вигляд та номінальні розміри зображені на рисунку 10.

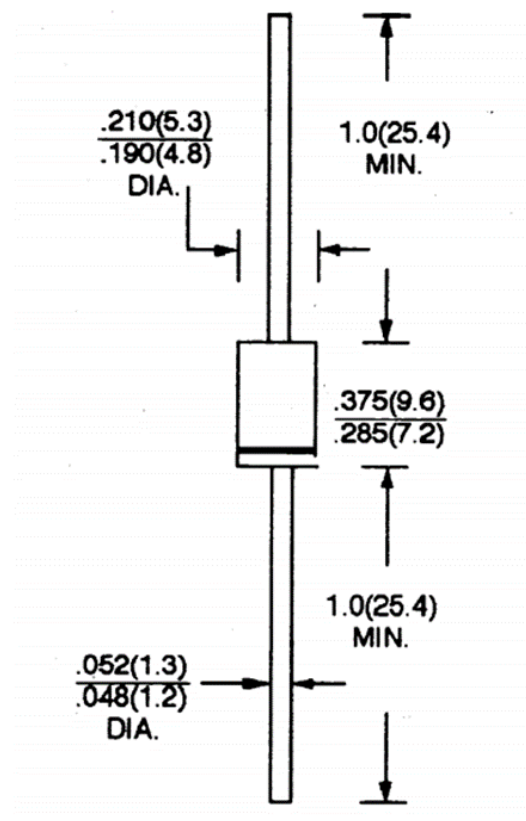


Рисунок 10 – Діод IN5408 у корпусі DO201AD

Схематично діод можна представити у вигляді кристала, що складається з двох напівпровідників (областей). Одна область кристала має провідність р-типу, а інша - провідність n-типу. Структура діоду зображена на рисунку 11.



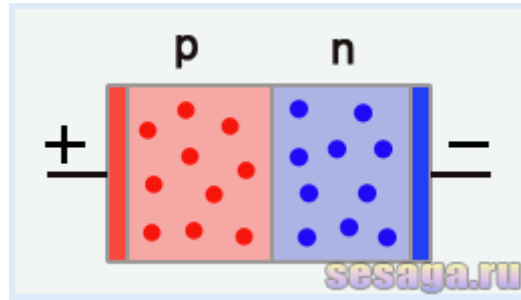


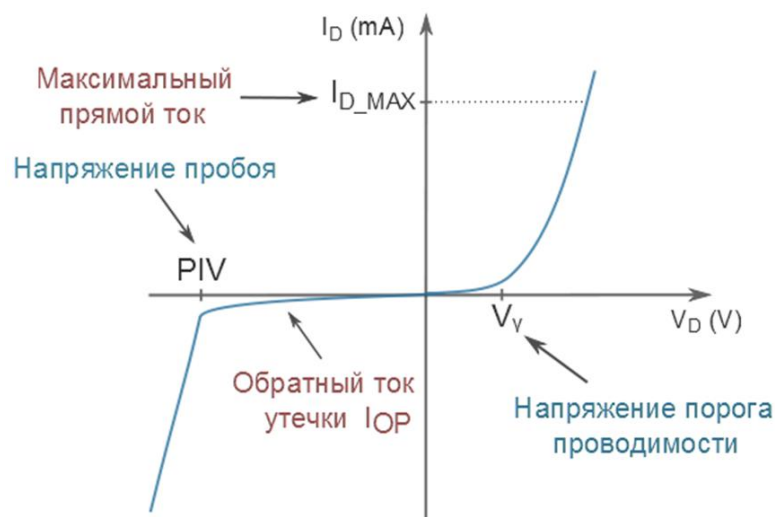
Рисунок 11 – Структура діода

На зовнішні поверхні областей нанесені контактні металеві шари, до яких припаяні дротові висновки електродів діода. Такий прилад може перебувати тільки в одному з двох станів:

- 1) Відкритий – коли він добре проводить струм;
- 2) Закритий – коли він майже не проводить струм.

Якщо під'єднати анод діода до плюсу джерела живлення, а катод до мінусу, тоді діод буде увімкнено у прямому режимі і він буде проводити струм. Якщо змінити полярності, тобто підключити навпаки, то тоді прийнято казати що він не проводить струм.

Вольт-амперна характеристика діода зображена на рисунку 12.



Зависимость тока от напряжения  
в настоящем диоде

Рисунок 12 – ВАХ діода

Основні технічні характеристики приладу зазначені у таблиці 6.2.					Лист
IA52.330BAK.005 ПЗ					
Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	

Таблиця 2 – Технічні характеристики діоду

Характеристика	Значення
Максимальна напруга	700 В
Максимальна зворотня напруга	1000 В
Максимальний прямий струм	3А
Максимальний імпульсний прямий струм( $t < 8.3\text{мс}$ )	200А
Зворотній струм при максимальній зворотній напрузі	50 $\mu\text{A}$

### 5.3 Конденсатори

Для розробки електричної принципової схеми було обрано електролітичні конденсатори в алюмінієвому циліндричному корпусі, з односпрямованим дротяними гнучкими виводами радіального типу (radial lead) або з жорсткими пелюстковими (snap-in) виводами, що зображені на рисунку 13.



Рисунок 13 – Зовнішній вигляд конденсатора та його позначення на електричній схемі

Представлені конденсатори мають полярний тип конструкції. Полярність висновків, номінальна напруга і ємність, а також маркування конденсатора вказані на корпусі за допомогою фарби. Визначити де плюс

або мінус конденсатора можна за відмітками на корпусі або по довжині

IA52.330BAK.005 ПЗ

Лист

Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	
------	------	----------	--------	------	--

висновків (мінусовий висновок короткий). Основні технічні характеристики знаходяться у таблиці 3.

Таблиця 3 – Технічні характеристики

Характеристика	Значення
Допустиме відхилення ємності	$\pm 20\%$
Струм витоку	3 мкА
Тангенс кута втрат	від 0,1 до 0,24
Напрацювання на відмову, не менше	2000 год
Номінальна ємність	680 мкФ, 470 мкФ, 330 мкФ
Номінальна напруга	200 В, 400 В
Робоча температура	85 °С, 105 °С

Радіальні електролітичні конденсатори широко застосовуються в блоках харчування і зарядних пристроях, частотних перетворювачах, аудіо та побутовій апаратурі.

При додаванні конденсатора в електричний ланцюг необхідно строго дотримуватись полярності його полюсів, ємність і номінальну напругу. Також необхідно забезпечити вільний простір навколо конденсатора для можливого спрацьовування захисного клапана. Перед установкою конденсатори слід розрядити, замикаючи виводи через резистор опором 1 кОм.

#### 5.4 Резистори

Для побудови електричної схеми був обраний резистор, що може застосовуватися в ланцюгах змінного, постійного та імпульсного струму. Зовнішній вигляд резистора зображено на рисунку 14.



Рисунок 14 – Зовнішній вигляд резистора

Активний опір цього резистора не змінюється в залежності від частоти, на відміну від конденсаторів і котушок індуктивності.

Зазвичай резистори маркують за допомогою цифрового коду або кольорових смужок. В даному випадку резистор має чотири смужки коричневого, чорного та золотого кольорів. Кожен колір відповідає за певний параметр елементу.

Основні технічні характеристики резистора знаходяться у таблиці 4.

Таблиця 4 – Технічні характеристики резистора

Характеристика	Значення
Допустиме відхилення	5%
Опір	200 Ом
Потужність	0,25 Вт
Тип виводів	Гнучкі
Тип корпусу	Вуглецевий
Тип монтажу	DIP
Вага	0,12 г

## 5.5 Елемент живлення

В якості елемента живлення було застосовано блок живлення від компанії SUNNY Comp. Tech., який зображено на рисунку 15.



Рисунок 15 – Блок живлення

Вхідна напруга становить 100 – 240 В змінного струму, частота 50/60 Гц, вихідна – 12 В постійного струму 1000 мА. Інші технічні характеристики приладу знаходяться у таблиці 5.

Таблиця 5 – Технічні характеристики блоку живлення

Характеристика	Значення
Потужність	12 Вт
Вихідна сила струму	1 А
Розміри вихідного роз'єму	2.1 мм × 5.5 мм
Полярність вихідного роз'єму	«+» в центрі
Температура експлуатації	Від 0 °С до 40 °С
Енергоефективність	≥ 77.8 %
Ресурс	50000 год
Вага	90 г

## 5.6 Понижуючий конвертер

Так як для коректної роботи електричної схеми елемент живлення має мати потужність 7 Вт, а обраний блок живлення має потужність 12 Вт, необхідно застосувати DC-DC перетворювач, а саме понижуючий конвертер, котрий зменшить значення напруги до необхідного. Для цього був обраний конвертер моделі LM2596, що зображений на рисунку 16. Основні технічні характеристики приладу знаходяться у таблиці 6.

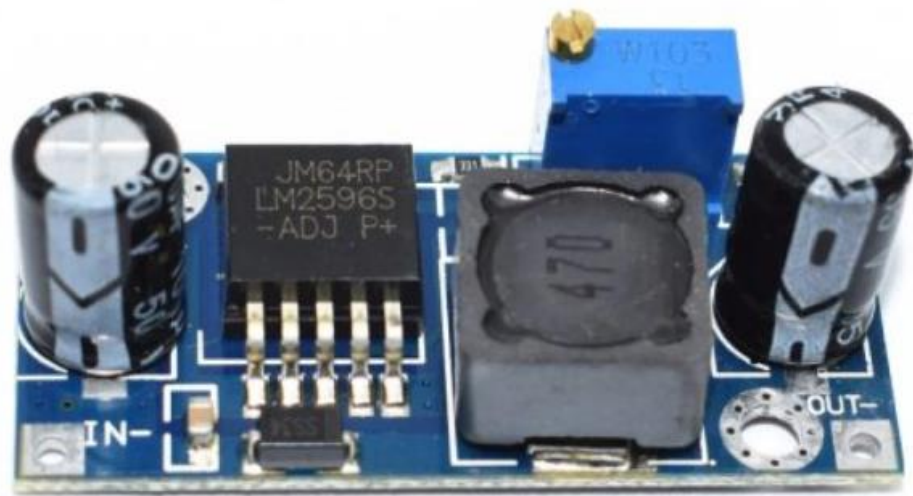


Рисунок 16 – Понижуючий конвертер LM2596

Таблиця 6 – Технічні характеристики

Характеристика	Значення
Тип випрямлення	Асинхронне
Вхідна напруга	4.5 В – 40 В
Вихідна напруга	3 В – 35 В
Вихідний струм	2 А
Ефективність перетворення	92%
Споживання без навантаження	6 мА
Робочий діапазон температур	Від -40 °C до +85 °C
Швидкість динамічної відповіді	5%, 200 мкс

Понижуючий конвертер постійного струму побудований на базі конвертеру моделі LM2596S. Обов'язковою умовою його експлуатації є те, що вхідна напруга має бути не менше ніж на 1.5 В вище ніж вихідна.

### 5.7 Кнопка-тумблер

Тумблер – це малогабаритний механічний перемикач. Застосовується головним чином для комутації ланцюгів управління в електро- і радіотехнічних приладах і пристроях.

Для даного проекту була обрана кнопка HF-606, що грає роль перемикача. Зовнішній вигляд та номінальні розміри кнопки зображені на рисунку 17.

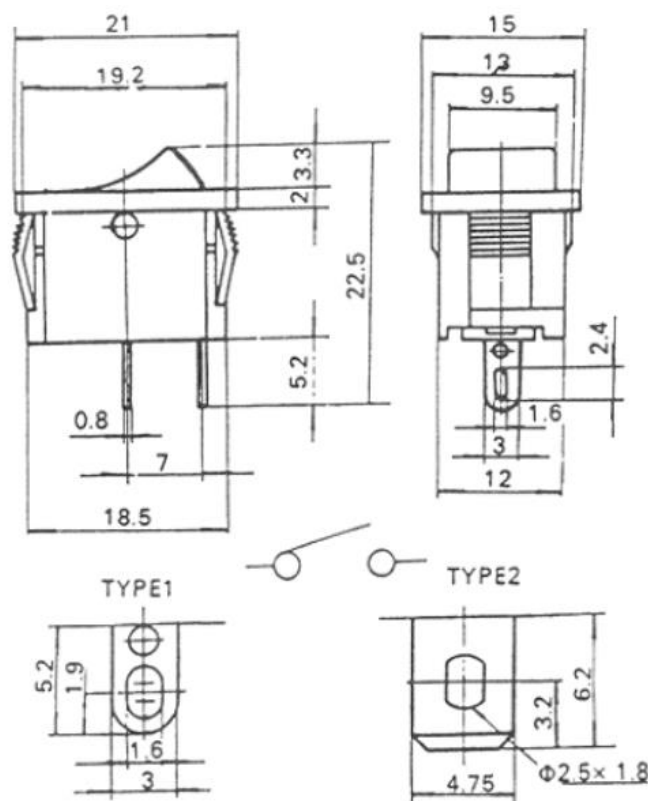


Рисунок 17 – Кнопка HF-606

Максимальний струм для коректної роботи при напрузі 125 В становить 10 А, при напрузі 250 В – 6 А.

### 5.8 Лампа розжарювання

					IA52.330БАК.005 ПЗ	Лист
Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

У даній схемі лампа слугує динамічним навантаженням на контур та виконує функцію індикації стану заряду конденсаторів. Лампи з матовою колбою ідеально підходять для непрямого освітлення в закритих світильниках і в тих випадках, коли є важливими яскраві іскристі світлові ефекти. Зовнішній вигляд лампи зображено на рисунку 18.



Рисунок 18 – Лампа накаливання

Технічні характеристики лампи знаходяться в таблиці 5.

Таблиця 7 – Технічні характеристики

Характеристика	Значення
Допустима напруга, не більше	230 В
Потужність	75 Вт
Опір у вимкненому стані	54 Ом
Опір у робочому стані	2 кОм



## 6 ПОБУДОВА АЛГОРИТМУ РОБОТИ ПРОГРАМИ

Для зручного представлення алгоритмів певних процесів та програм зручно використовувати блок-схеми. Визначений набір блоків (геометричних елементів) використовується для представлення інформації, кожен з яких позначає різні процеси і операції. Опис і призначення основних блоків наведені в таблиці 8.

Таблиця 8 – Блоки алгоритму

Назва	Призначення
Термінатор	Вхід у або вихід з зовнішнього середовища (початок або кінець процесу)
Процес	Одна або декілька операцій, обробка даних будь-якого вигляду
Рішення	Обробка та перевірка умови, рішення. Вхід у блок може бути лише один, виходів – три або більше
Зумовлений процес	Виконання процесу, що складається з одної або більше операцій, які визначені в іншому місці програми
Дані	Введення або виведення даних (блок, що призначений для обробки та відображення результатів обробки даних)
З'єднувач	З'єднання перерваних ліній потоку (наприклад, при переході на іншу сторінку)
Коментар	Опис детальної інформації про кроки процесу, що розміщується у квадратній дужці по всій висоті

Для побудови блок-схеми програмного забезпечення було використано такий склад блоків: термінатор, процес, рішення, зумовлений процес, з'єднувач.

Алгоритм складається з 14 блоків. Умовно всю блок-схему можна розбити на три частини:

- 1) Введення параметрів у спеціально призначені вікна;
- 2) Обрахунок даних та запис результату у файл;
- 3) Зчитування результату з файлу та відображення користувачеві.

Зовнішній вигляд алгоритму зображено на рисунку 19.

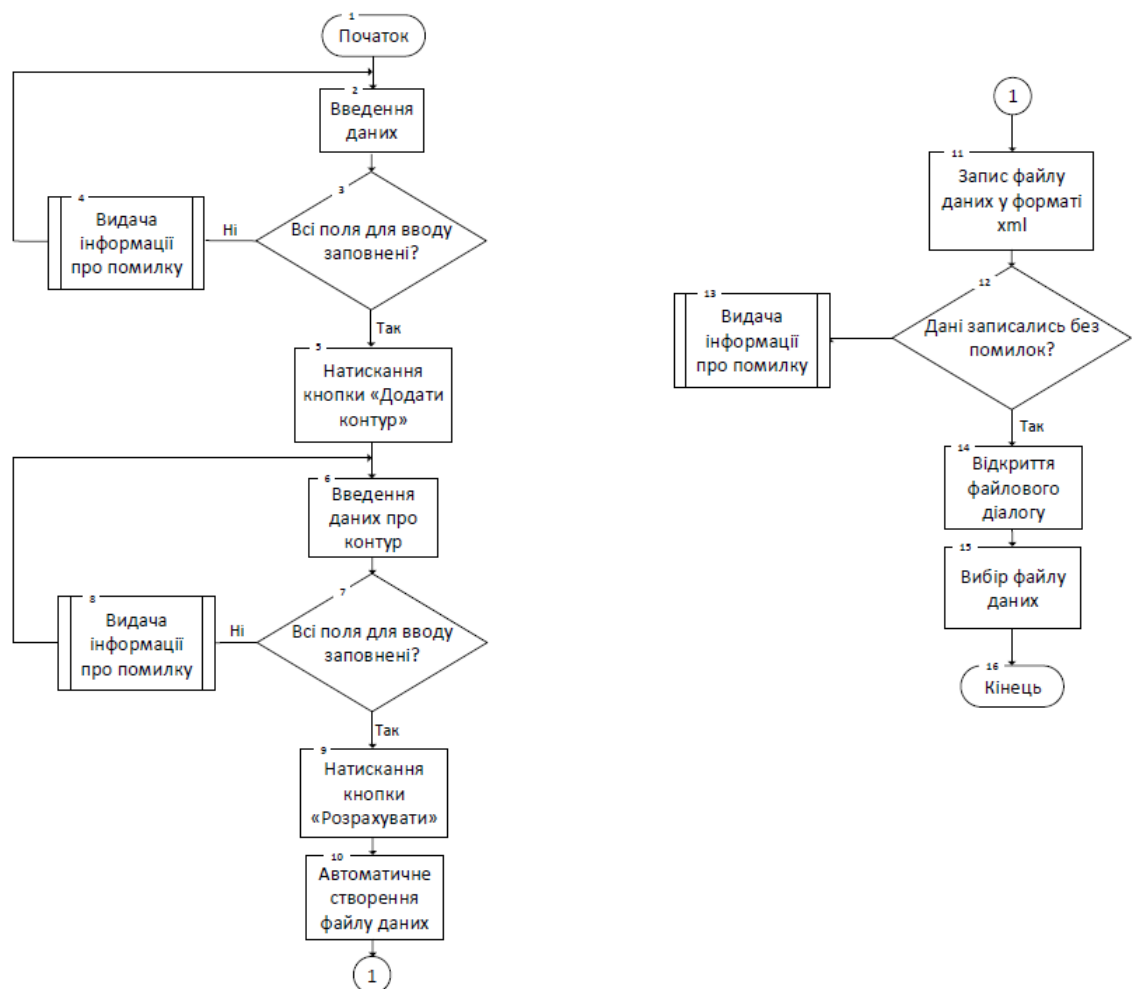


Рисунок 19 – Блок-схема алгоритму

Алгоритм працює в наступному порядку:

- 1) Запуск програми;

- 2) Після цього відкриється вікно, що зображене на рисунку 3, де потрібно ввести такі дані: діаметр стволу, діаметр кулі, довжина кулі, приріст часу;
- 3) Далі йде перевірка того, чи всі поля заповнені та чи заповнені правильно. Якщо ні – з'явиться діалогове вікно з описом помилки;
- 4) Після заповнення даних, потрібно натиснути на кнопку «Додати контур»;
- 5) Відкриється діалогове вікно, що зображене на рисунку 5, де потрібно ввести параметри контуру;
- 6) Далі йде перевірка того, чи всі поля заповнені та чи заповнені правильно. Якщо ні – з'явиться діалогове вікно з описом помилки;
- 7) Далі потрібно натиснути на кнопку «Розрахувати»;
- 8) В рамках проведення розрахунків програма автоматично створить файл даних у форматі xml;
- 9) Також під час цього відбувається перевірка того, чи не виникла помилка під час розрахунків. Якщо так – з'явиться діалогове вікно з описом помилки;
- 10) Якщо дані записались без помилок, їх можна буде відкрити та проаналізувати.

## 7 МЕТОД ПРОВЕДЕННЯ РОЗРАХУНКІВ

Для проведення розрахунків була застосована програма FEMM, принцип дії якої базується на методі магнітних методів скінчених елементів.

Метод кінцевих елементів, зазвичай на стадії проектування і розробки продукту, використовує багато дисциплін, в першу чергу з сімейства машинобудування (такі як аерокосмічна, морська, біометрична і автомобільна промисловість). Кілька сучасних пакетів ІТУ включають спеціальні елементи, такі як теплові, електромагнітні, текучі і конструкційні робочі середовища. У структурному моделюванні МСЕ дуже допомагає в створенні жорстких і силових візуалізацій в зсувах і вигинах, а також у відображенні поширення сил і переміщень.

Програми МСЕ надають широкий спектр можливостей моделювання для систем управління складністю, моделювання та аналізу. При необхідності в більшості інженерних програм можна змінити бажаний рівень точності, час, необхідний для необхідних і пов'язаних розрахунків.

МСЕ дозволяє проектувати, налагоджувати і оптимізувати продукти до їх випуску. Цей потужний інструмент проектування значно поліпшив стандарти технічного проектування і методологію цього процесу в багатьох областях. Використання МСЕ скоротило час, за яке продукт перейшов від концепції до конвеєра. Його основна ідея полягала в тому, щоб поліпшити оригінальні прототипи за допомогою МСЕ, що сприяло прискоренню їх тестування і розробки. В цілому, переваги МСЕ полягають у підвищенні точності, поліпшення дизайну і поліпшення видимості його критичних параметрів, створення віртуальних прототипів, скорочення кількості реальних прототипів, прискоренні і скорочення витрат на проектування, підвищення продуктивності та прибутковості.

До недоліків методі відноситься те, що потрібен великий обсяг пам'яті ЕОМ і висока швидкість розрахунку. Проте з розвитком технологій цей недолік практично усунений.

Розглянемо дію методу за допомогою двох прикладів, на які його

можна екстраполювати.					Лист
Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	

IA52.330БАК.005 ПЗ

Нехай P1 є одновимірною проблемою:

$$P1 : \begin{cases} u'' = f \text{ in } (0, 1), \\ u(0) = u(1) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

де  $f$  – задана функція;

$u$  – невідома функція від  $x$ ;

$u''$  – друга похідна функції  $u$  по змінній  $x$ .

Тоді двовимірна проблема P2 (проблема Діріхле):

$$P2 : \begin{cases} u_{xx} + u_{yy} = f & \text{in } \Omega, \\ u = 0 & \text{on } \partial\Omega, \end{cases} \quad (2)$$

де  $\Omega$  – відкрита зв'язна область на площині  $(x, y)$ ;

$u_{xx}$  та  $u_{yy}$  – другі похідні функції  $u$  по  $x$  та по  $y$  відповідно.

Проблему P1 можна розв'язати прямо — обрахуванням первісних. Хоча цей метод розв'язування задач граничних значень працює доді, коли є тільки один просторовий вимір і метод не узагальнюється на багатовимірні задачі чи на задачі виду  $u + u'' = f$ . Тому застосуємо метод скінчених елементів на P1 і опишемо його узагальнення на P2.

Розв'язок буде відбуватись у два кроки:

- 1) Спочатку потрібно перетворити ЧДР у варіаційну форму. Для цього не потрібно робити ніяких обчислень, всі перетворення робляться вручну, а не машинно;
- 2) Далі буде проведена дискретизація, де варіаційна форма є дискретизованою у скінченновимірному просторі. Далі буде отримано формулу для скінченновимірної лінійної задачі, розв'язок якої буде розв'язком початкового ЧДР. Дану задачу вирішує комп'ютер.

## 8 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

При розробці програмного забезпечення для створення інтерфейсу моделювання електромагнітного прискорювача мас було обрано Windows Forms за їхню простоту та функціональність, яка повністю покриває вимоги проекту. Розрахункова частина виконується за допомогою безкоштовної програми для складних розрахунків у магнітостатиці FEMM 4.2, а точніше СОМ об'єкту цієї програми, та спеціально розробленого скрипта для неї на мові програмування Lua.

### 8.1 Програма FEMM 4.2

Метод магнітних методів кінцевих елементів (FEMM) спрямований на те, щоб забезпечити прості у використанні інструменти для вирішення електромагнітних задач з мінімальними зусиллями. Програма включає в себе набір інших програм, що дозволяють задавати параметри задачі, аналізувати їх і забезпечувати життєздатне рішення.

Метод кінцевих елементів є математичним підходом до вирішення різних завдань, використовуючи кілька рівнянь для наближення до складного рівняння, яке забезпечує стабільне рішення. Ця програма дозволяє реалізувати метод магнетизму і електростатики.

Щоб вирішити завдання, потрібно вказати параметри в CAD-подібному додатку і використовувати один з доступних вирішувачів для пошуку рішення. FEMM – це назва основного інструменту з пакета, який дозволяє створювати задачу та отримувати доступ до вирішувачів.

Його інтерфейс простий у використанні і дозволяє додавати об'єкти, символи та матеріали для визначення проблеми. Можна також імпортувати макет з DXF або розширених файлів метаданих. Програма підтримує сценарії Lua, що дозволяє автоматизувати певні дії та обробляти декілька завдань з мінімальною взаємодією з користувачем.

Після того, як завдання було налаштоване, ви можете викликати один

з вирішувачів з меню «Аналіз», яке також відображає результати після					Лист
Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	

IA52 330546-005 РЗ

завершення рішення. У вас також є можливість генерувати ділянку інтеграції рішення.

Якщо ви використовуєте програму вперше, вам слід прочитати включене керівництво перед тим, як створювати задачі або починати їх аналізувати. Пакет також включає зразки, які допоможуть вам зрозуміти та перевірити основні функції.

Пакет інструментів FEMM може допомогти дослідникам і студентам заощадити час, коли вони потребують вирішення низькочастотних електромагнітних проблем. Зовнішній вигляд інтерфейсу зображено на рисунку 20.

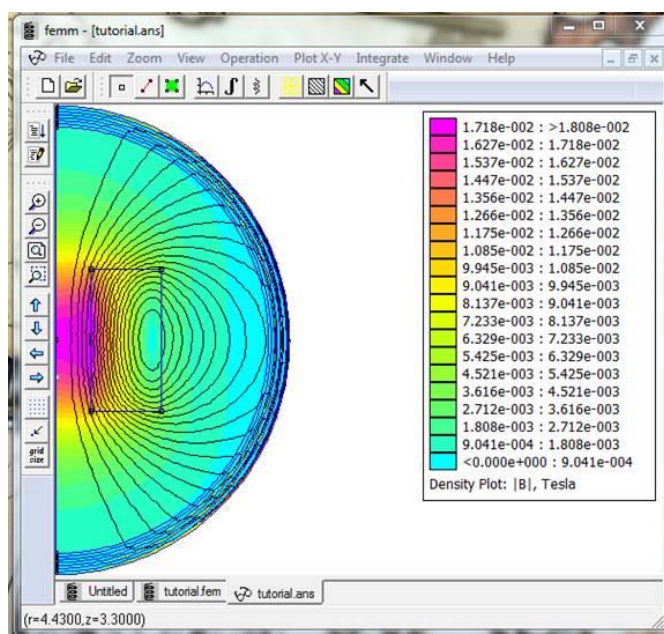


Рисунок 20 – Вигляд програми FEMM 4.2

## 8.2 Інтерфейс розробленого програмного забезпечення

У цьому розділі буде описаний простір, де відбувається зручна взаємодія людини з програмою, а саме її інтерфейс користувача.

Послідовність взаємодії користувача з інтерфейсом наступна:

- 1) При запуску програми моделювання електромагнітного прискорювача мас користувачу відкриється стартове вікно, у якому можна виконати наступні дії: ввести дані про різні параметри прискорювача, провести

					Лист
Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	

розрахунки на основі введених даних, додати контур та розрахувати його параметри, відкрити файл з вже обрахованими даними. Зовнішній вигляд стартового вікна зображено на рисунку 21.

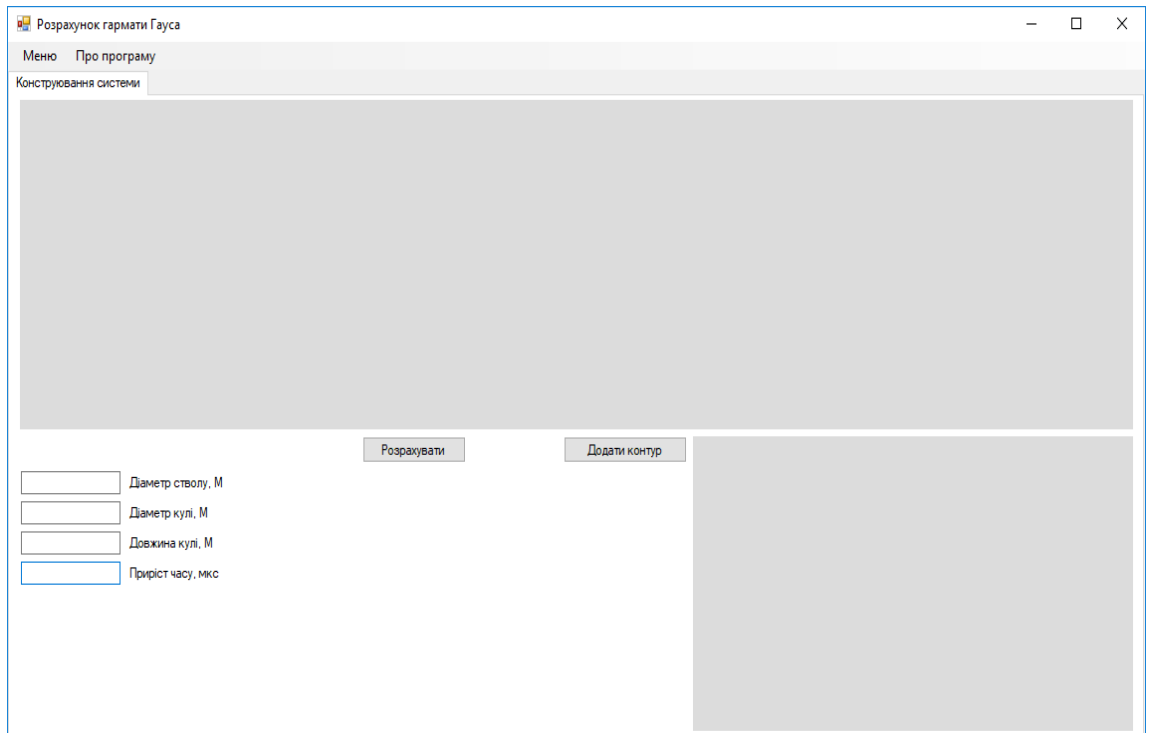


Рисунок 21 – Інтерфейс стартового вікна

- 2) Натиснувши на кнопку «Меню» можна бачити ще дві випадаючі кнопки: «Відкрити файл» та «Вихід». При натисканні на кнопку «Вихід», програма закриється. При натисканні на кнопку «Відкрити файл», відкривається файлове діалогове меню, де користувачу надається змога вибрати файл з розрахунками, якщо такий наявний. Діалогове меню зображене на рисунку 22.



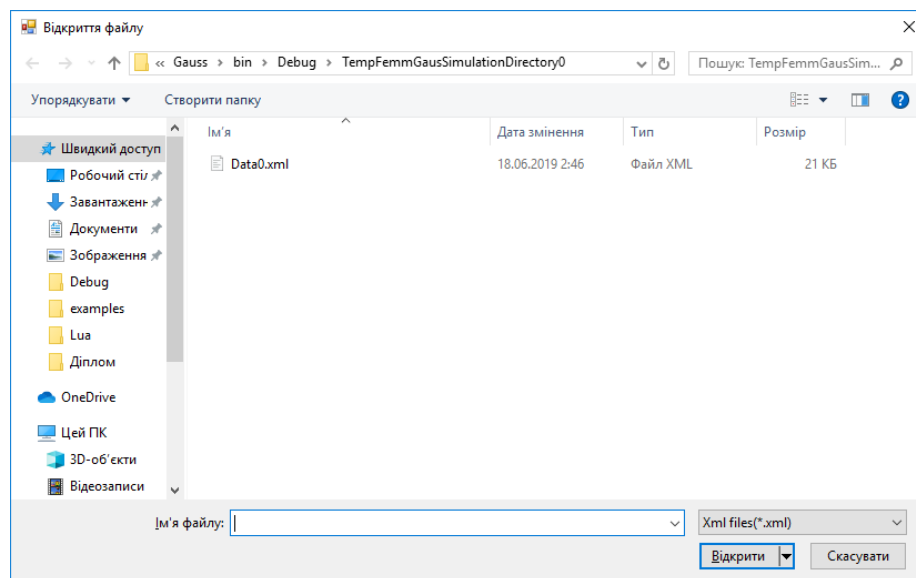


Рисунок 22 – Файлове діалогове вікно для вибору XML файлу з розрахунками.

- 3) Натиснувши на кнопку «Про програму», користувач побачить форму з описом, що зображена на рисунку 23. У ній міститься інформація про мету створення програми, назва програми, за допомогою якої виконується алгоритм розрахунків, а також детальна інструкція користування програмою.

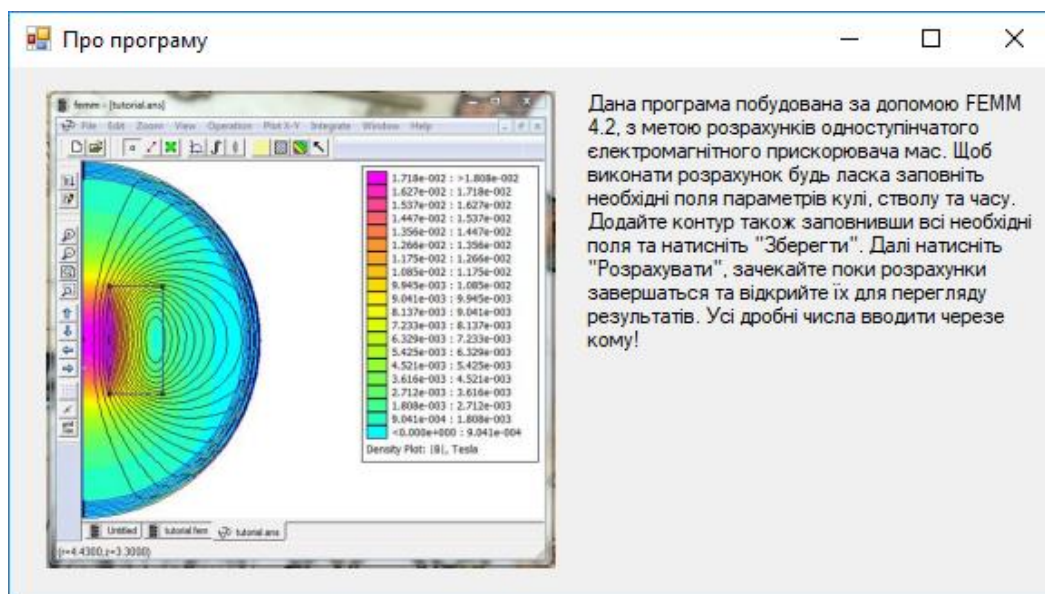


Рисунок 23 – Вікно «Про програму»

- 4) На вкладці «Конструювання системи» користувач має змогу внести параметри моделювання, такі як: довжина та діаметр кулі, діаметр стволу.

(який має бути більшим діаметра кулі) та інкремент часу процесу симулювання (чим менше значення, тим більша точність. Час розрахунку також збільшується). Слід звернути увагу, що всі дробові значення параметрів потрібно вводити через кому.

- 5) Для початку розрахунку обов'язково потрібно додати контур, який представляє з себе параметри котушки та конденсатора, та деякі стартові параметри системи.
- 6) Для додавання контуру необхідно натиснути на кнопку «Додати контур». Відкриється вікно для введення параметрів (напруга, ємність конденсаторів, довжина катушки тощо), яке зображене на рисунку 24.

Параметри контуру

Напруга на конденсаторах, В

Ємність конденсаторів, мкФ

Довжина катушки, М

Діаметр катушки, М

Товщина магнітопроводу, М

Діаметр обмоточного дроту, М

Подвійна товщина ізоляції дроту, М

Початкова координата кулі відносно катушки, М

Зберегти

Рисунок 24 – Вікно «Параметри контуру»

- 7) При натисканні на кнопку «Зберегти», вікно «Параметри контуру» закриється. При цьому на головному екрані зліва внизу відобразиться контур, який додав користувач (рисунок 25). При подвійному натисканні лівою кнопкою миші за контур, відкриваються його параметри, які можна змінити.

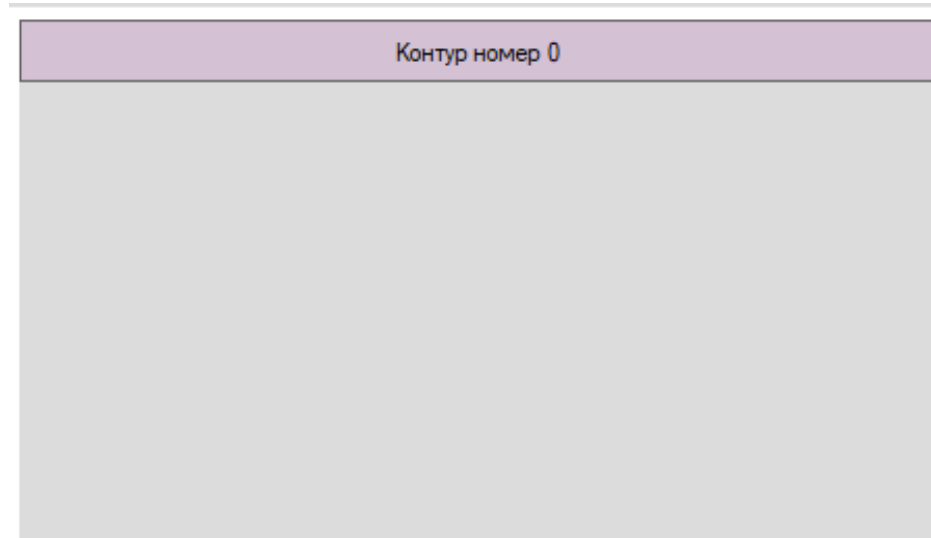


Рисунок 25 – Доданий контур

- 8) Тепер коли усі дані уведені, користувачу дозволяється натиснути на кнопку «Розрахувати». Тоді почнеться розрахунок та на верхній панелі головного екрану буде зображена модельована система (рисунок 26).



Рисунок 26 – Малюнок системи із заданими параметрами

Розрахунок відбувається за допомогою програми FEMM 4.2 та підпрограми, яка створює необхідні файли та папки для обрахунків, такі як скрипт на мові програмування Lua. Після завершення обрахунку, усі непотрібні файли видаляються, залишається лише файл даних обрахунку у форматі xml, який створює скрипт, та сам скрипт.

- 9) Після закінчення розрахунку, користувач може відкрити файл даних розрахунку за допомогою кнопок «Меню» та «Відкрити файл», та вибрати необхідний файл.
- 10) Після вибору файлу, на головному екрані відкриється ще одна вкладка

Рисунок 27 – Вкладка сторінки результатів

Перейшовши на неї, користувач може бачити екран сторінки результатів моделювання як в текстовому, так і в графічному вигляді. Зліва зображені результати у текстовому вигляді, де зібрана вся інформація про установку та результати моделювання. У правій частині знаходяться кнопки, при натисканні котрих користувач може бачити різні графіки параметрів системи відносно часу. Зовнішній вигляд вікна зображено на рисунку 28.

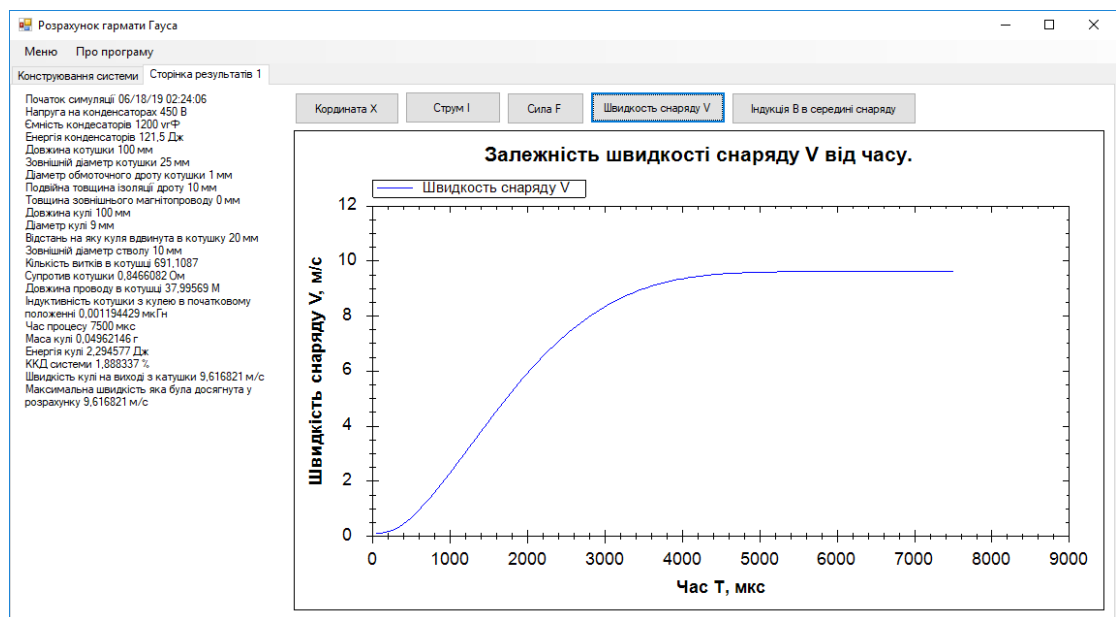


Рисунок 28 – Вкладка з результатами

### 8.3 Код розробленої програми

Програма GausCalculation реалізує процес підготовки до розрахунку, тобто створює необхідні папки та файли для початку симуляції та початку процесу розрахунку. Основна функція програми – дозволити паралельний

обрахунок. Являє собою консольний додаток без вікна, який приймає два параметри:

- 1) Перший string містить номер процесу у запусненій програмі;
- 2) Другий string містить початкові параметри розрахунку розділені символом. «|».

Дана програма містить наступні класи:

- Клас SimulationData – використовується при десеріалізації Xml файлу даних. Містить дані про розрахунки.
- Клас CountorInfo – містить інформацію про доданий контур, таку як параметри котушки та конденсаторів.

Клас містить два конструктори з такими сигнатурами:

```
public CountorInfo()
```

```
public CountorInfo(float Capasitor_U,float Capasitor_C,float Coil_L,float  
Coil_D, float Wire_D,float WireIzolation_D,float MagWire_D,float  
Coil_Penetration,float Lenght_Between_Coils,Label label)
```

- Клас Form1 – частковий клас який описує об'єкти на основній формі, та їх функціонал.
- Клас CustomTabPage наслідується від TabPage. Містить весь функціонал TabPage та деякі додаткові поля для даних розрахунів. Має конструктор public CustomTabPage(string file) : base(), параметр якого містить повний шлях до файлу даних розрахунів.
- Клас Form2 – містить форму для вводу параметрів контуру. Функція зберігає параметри які були введені до полів контуру на основну форму.

```
private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
```

- Клас Form3 – містить форму для опису програми та інструкцій при роботі з нею.

Програма складається з таких функцій:

- 1) Функція яка додає контур на форму;

```
public void AddCountor(float Capasitor_U, float Capasitor_C, float Coil_L,
float Coil_D, float Wire_D, float WireIzolation_D, float MagWire_D, float
Coil_Penetration, float Lenght_Between_Coils)
```

2) Функція яка відкриває форму для створення контуру;

```
private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
```

3) Функція яка відкриває форму контуру для повторного регулювання;

```
private void Contour_DoubleClick(object sender, EventArgs e)
```

4) Функція ініціалізує обрахунки та малює вид гармати із заданими параметрами;

```
private void button3_Click(object sender, EventArgs e)
```

5) Функція яка ініціалізує вихід із програми;

```
private void exit_Click(object sender, EventArgs e)
```

6) Функція яка відкриває файл з обрахунками та створює вкладку з обрахунками;

```
private void openFile_Click(object sender, EventArgs e)
```

7) Функція яка відкриває вікно «Про програму»;

```
private void openAbout(object sender, EventArgs e)
```

8) Функція яка малює графіки на сторінці даних розрахунків.

```
private void graph_Click(object sender, EventArgs e)
```

Також був розроблений скрипт для програми FEMM 4.2 на мові програмування Lua. Скрипт містить програмний код який в більшості складається з внутрішніх функцій FEMM 4.2, та код для розрахунку та виводу кінцевих даних у xml файл даних.

## 9 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Метою розробки даного програмного забезпечення було дослідження зібраної схеми та підбір оптимальних параметрів. Усі розрахунки проводилися при сталих ємності, напрузі та діаметру обмоточного дроту. Програма моделює вистріл з кулею зі сталі марки 1411, підвищенолегірованою.

Система гармати має такі параметри:

- 1) Конденсатори ємністю 1300 мкФ.
- 2) Котушку довжиною у 75 мм, зовнішнім діаметром 26 мм. Намотаної з мідного дроту діаметром 0,5 мм.
- 3) Снаряд довжиною у 77 мм та діаметром у 4 мм.
- 4) Пластмасовий ствол діаметром 8 мм.

На даній програмі будуть проведені такі розрахунки:

- 1) Підбір оптимального розташування снаряду відносно котушки.
- 2) Підбір оптимального діаметру снаряду, не перебільшуючи діаметр стволу для вирахованого раніше місця старту.
- 3) Підбір оптимальної довжини котушки для наявного снаряду довжиною у 77 мм, діаметром Який було отримано на минулому розрахунку.

### 9.1 Дослід перший

Після проведених обчислень підбору оптимального розташування снаряду, були отримані результати, які показано у таблиці 9.

Нульові значення означають, що котушка та снаряд були на великій відстані один від одного і їхня взаємодія була слабкою, що майже не вплинуло на снаряд. Графік залежності ККД системи від розташування снаряду у котушці зображений на рисунку 29.

Таблиця 9 – Результати моделювання прискорення

					IA52.330БАК.005 ПЗ	Лист
Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Відстань снаряду відносно катушки, мм	ККД системи, %	Енергія кулі, Дж	Швидкість кулі на виході з катушки, м/с
-50	0	0	0
-45	0	0	0
-40	0	0	0
-35	0	0	0
-30	0	0	0
-25	0	0	0
-20	0	0	0
-15	0,218	0,209	7,554
-10	0,303	0,291	8,894
-5	0,34	0,325	9,412
0	0,31	0,298	9
5	0,231	0,222	7,773
10	0,137	0,131	5,981
15	0,043	0,041	3,366
20	-3,818E-05	1,03E-07	-0,005
25	-3,77E-05	5,38E-07	-0,012
30	-3,81E-05	1,80E-07	-0,007
35	-3,83E-05	3,66E-08	-0,003
40	-3,72E-05	1,06E-06	-0,017
45	-3,77E-05	6,06E-07	-0,012
50	-3,77E-05	5,23E-07	-0,019

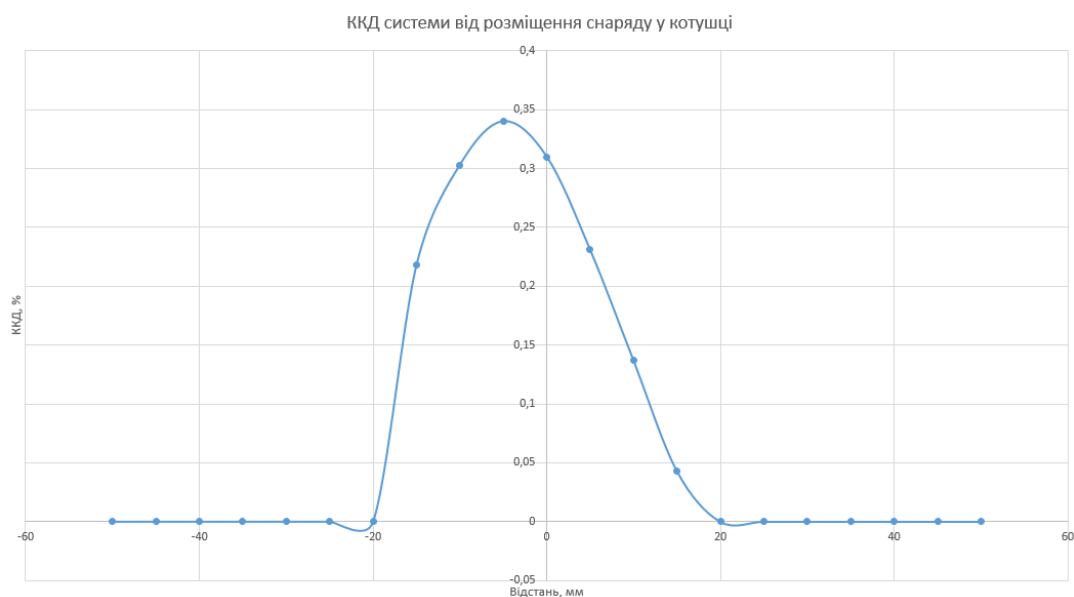


Рисунок 29 – Графік залежності

Графік залежності енергії снаряду від розташування снаряду у катушці зображено на рисунку 30.



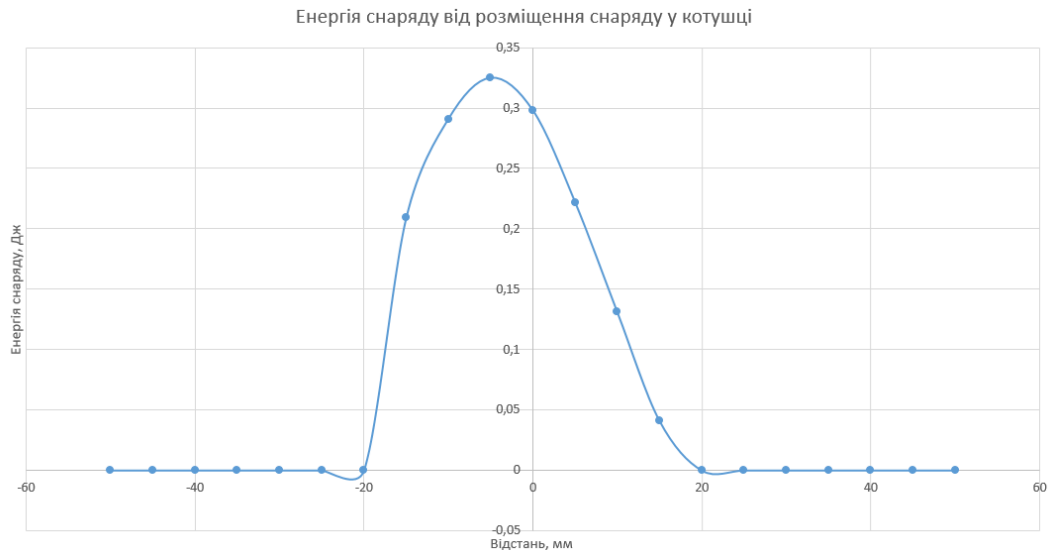


Рисунок 30 – Графік залежності

Графік залежності швидкості снаряду на виході з катушки від розташування снаряду у катушці зображено на рисунку 31.

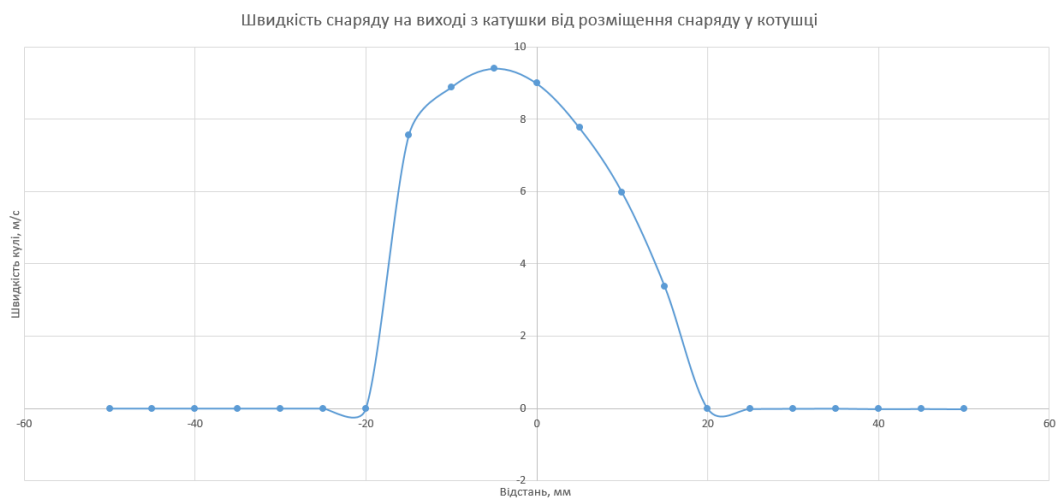


Рисунок 31 – Графік залежності

Результат: найкраще розташування снаряду – це 5 мм перед катушкою, ККД в цьому випадку дорівнює 0,34 %, енергія кулі 0,325 Дж, швидкість на виході 9,412 м/с.

Таке розташування обумовлено тим, що снаряд прискорюється до середини катушки, після проходження центру катушки на нього буде діяти

протилежна за напрямом сила, яка буде прагнути втримати снаряд у центрі

IA52.330БАК.005 ПЗ

					Лист
Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	

катушки, тому після проходження центру снарядом, він починає сповільнюватися. Це можна чудово бачити на графіках дії сили на снаряд, що зображені на рисунках 32, 33 та 34.

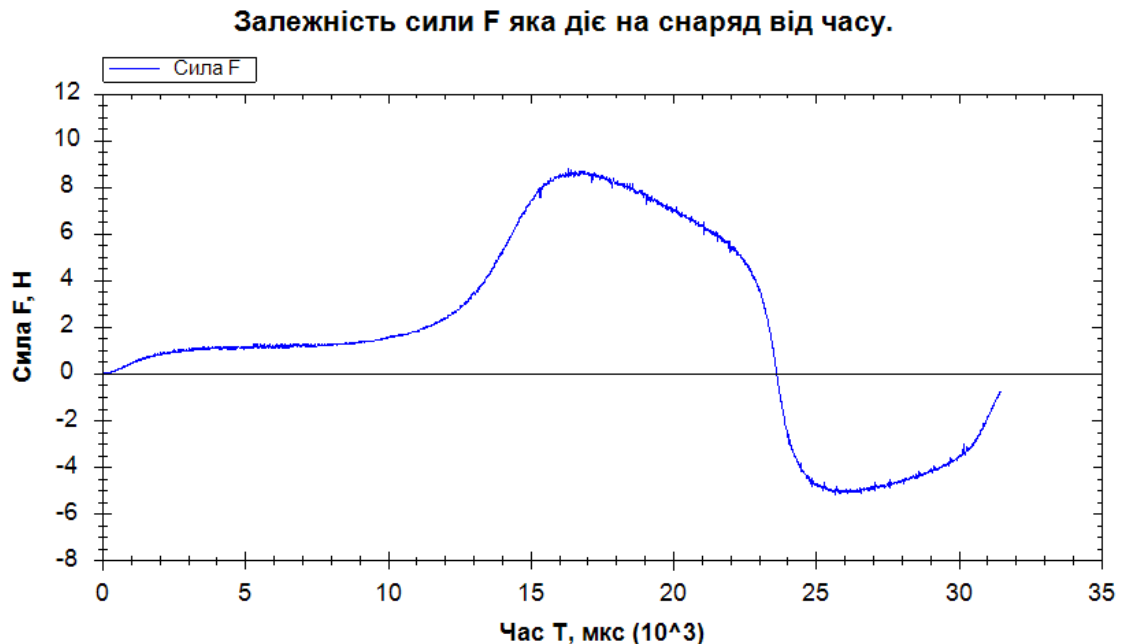


Рисунок 32 - Графік дії сили та її напрямку на снаряд, що знаходився на відстані 15 мм від катушки

З цього графіку можна бачити, що від нуля до 10 мс сила плавно наростає. Це відбувається тому, що снаряд знаходиться задалеко від катушки тому їх початкова взаємодія слабка.

Далі з 11 мс до 23 мс йде різке збільшення сили яка дія на снаряд. Це пояснюється тим, що снаряд влетів в катушку але ще не перетнув її середину та прискорюється.

На 24 мс снаряд перетинає середину катушки та сила, яка на нього діє, дорівнює нулю. З 25 мс на снаряд діє гальмуюча сила, оскільки конденсатори ще не розрядились.

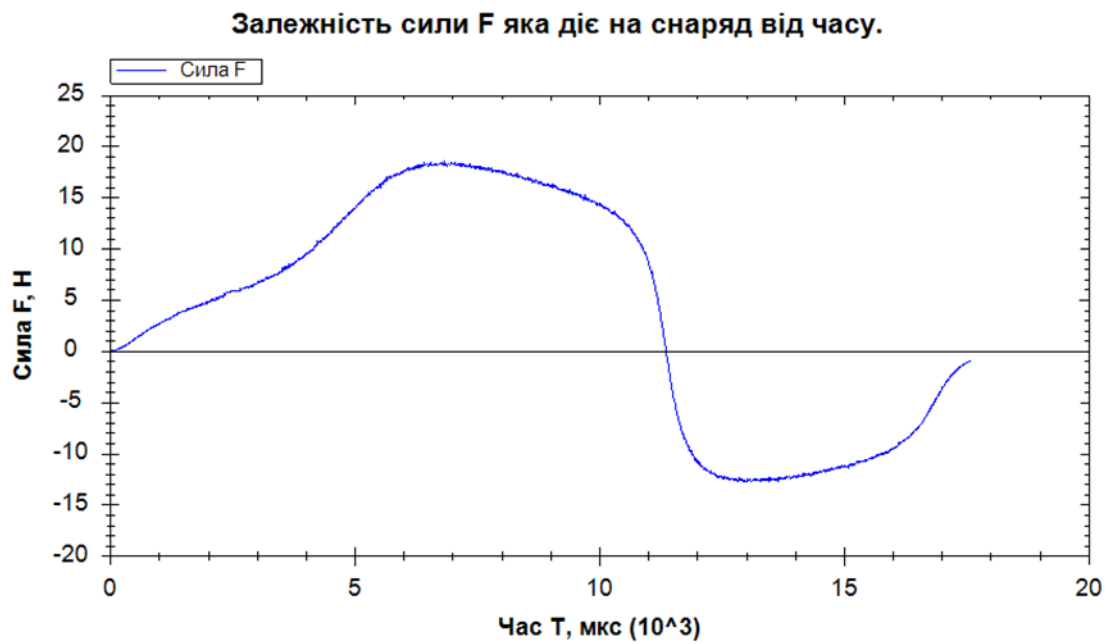


Рисунок 33 – Графік дії сили та її напрямку на снаряд, що знаходився на відстані 5 мм від котушки

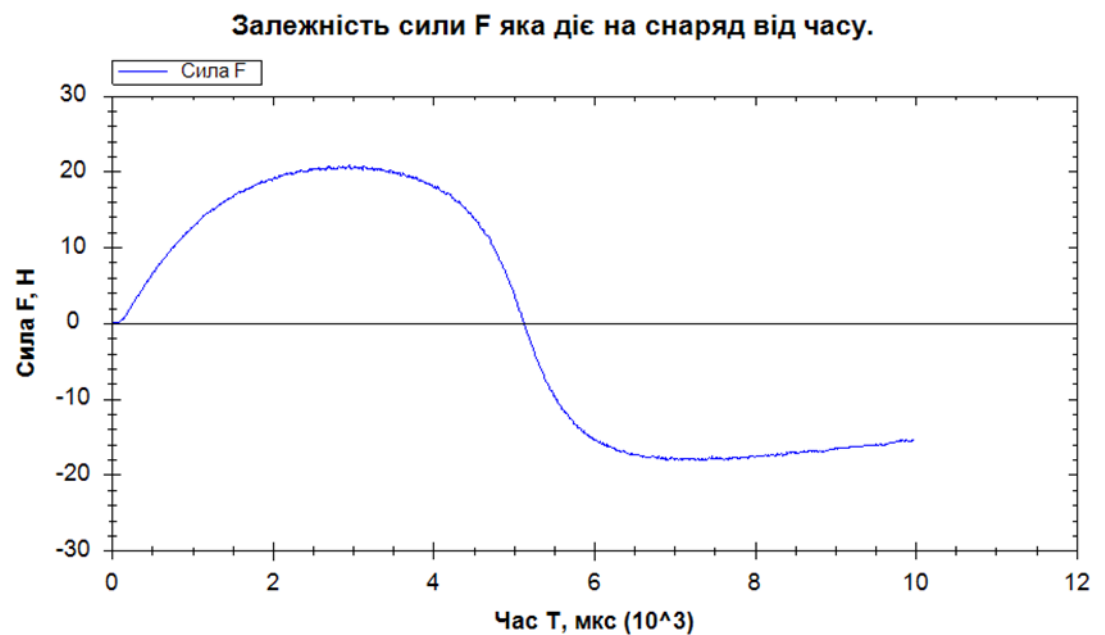


Рисунок 34 – Графік дії сили та її напрямку на снаряд, що знаходився на 50 мм зануреним у котушку

Порівнявши ці три графіки на 15 мм, 5 мм та 50 мм, можна бачити, що відстань 5 мм від котушки є оптимальною тому що снаряд близько до котушки і на нього сильніше діє магнітне поле, порівняно з розташуванням на відстані 15 мм. Це забезпечує швидкий розгін.

Порівняно з 50 мм, він менше гальмується після проходження крізь центр котушки, оскільки йому потрібен час аби пролетіти до центра, за цей час конденсатори розрядяться більше, аніж у ситуації, коли снаряд заглиблений у котушку на 55 мм.

## 9.2 Дослід другий

Підбір оптимального діаметру снаряду, не перебільшуючи діаметр стволу для вирахованого раніше місця старту, знаходиться у таблиці 10.

Таблиця 10 – Результати моделювання прискорення при різних діаметрах снаряду

Діаметр снаряду, мм	ККД системи, %	Енергія кулі, Дж	Швидкість кулі на виході з катушки, м/с
1			
2	0,101	0,097	10,311
3	0,223	0,214	10,181
4	0,342	0,328	9,452
5	0,475	0,456	8,918
6	0,597	0,573	8,327
7	0,671	0,644	7,566

Графік залежності ККД системи від діаметру снаряду знаходиться на рисунку 35. Графік залежності енергії снаряду від самого снаряду зображено на рисунку 36. Графік залежності швидкості снаряду від його діаметру зображено на рисунку 37.

Як ми можемо бачити з графіків, збільшуючи діаметр снаряду, ми збільшуємо кінетичну енергію снаряду за рахунок його ваги, та за рахунок збільшення площі поперечного перерізу, так як вважається що лінії індукції усередині котушки однорідні та паралельні осі котушки. Тоді магнітний потік який дорівнює  $H=BS$ , який проходить через снаряд змінюється пропорційно до змінення площі. Можна за цим прослідкувати на графіках сили від часу у 4 мм снаряду та 7 мм.

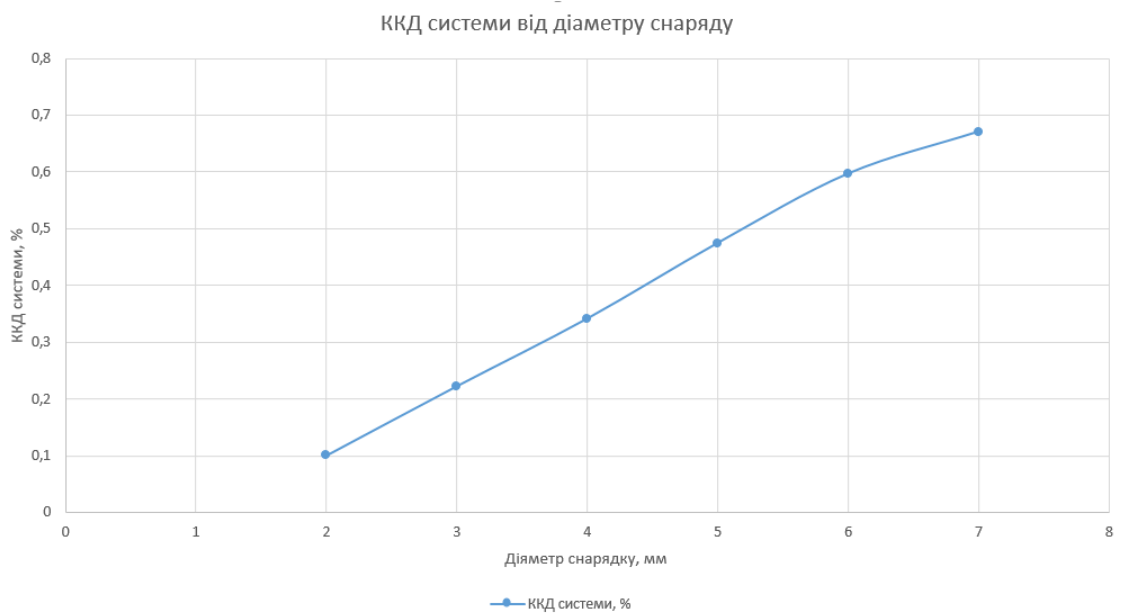


Рисунок 35 – Графік залежності ККД системи від діаметру снаряду

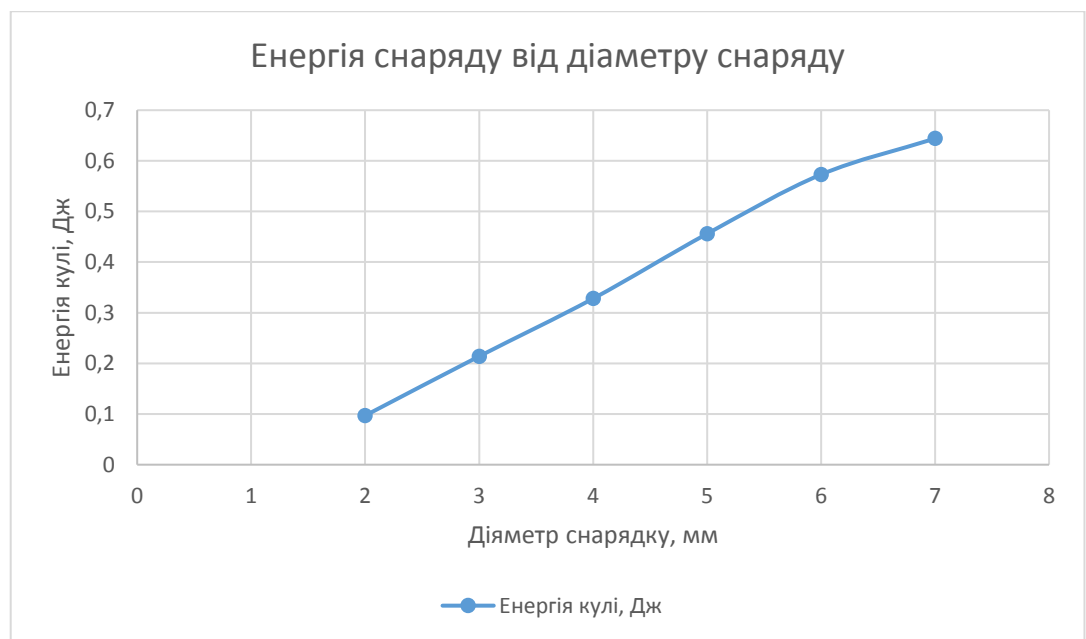


Рисунок 36 – Графік залежності енергії снаряду від самого снаряду

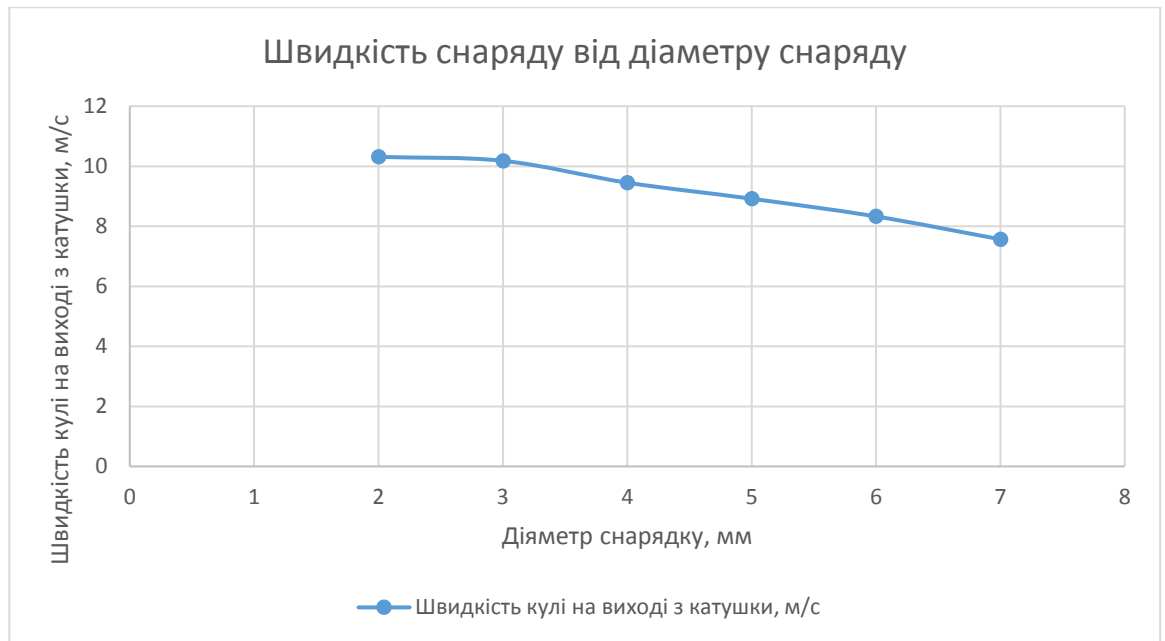


Рисунок 37 – Графік залежності швидкості снаряду від його діаметру

Залежність сили діючої на снаряд від часу (снаряд діаметром 4 мм) зображено на рисунку 38.

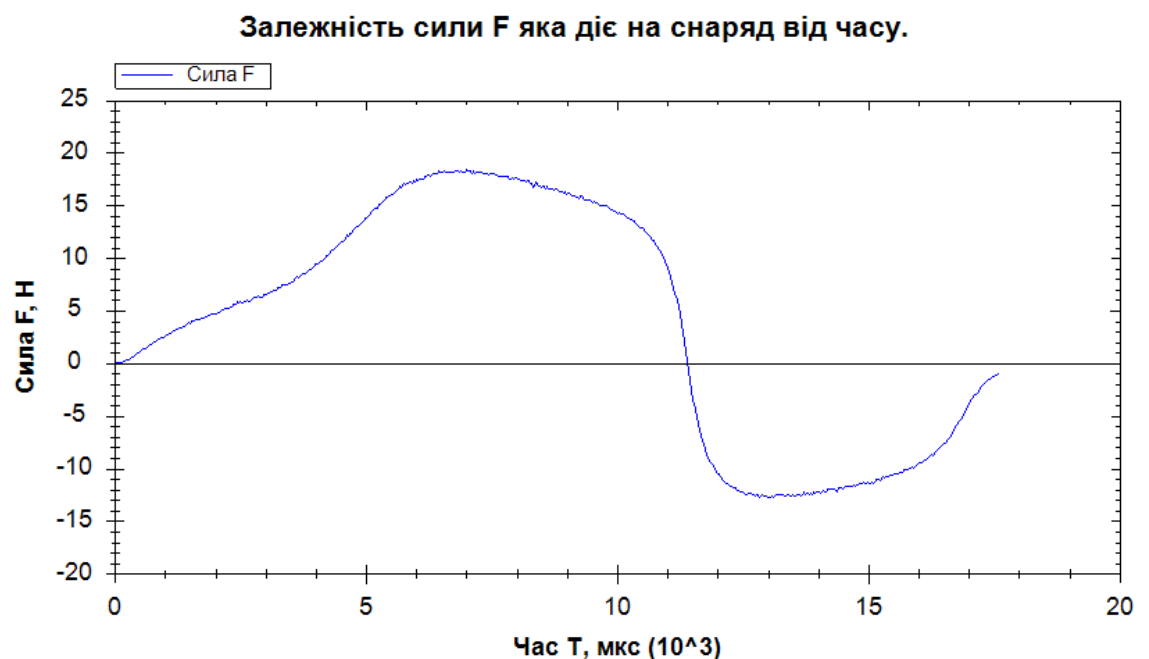


Рисунок 38 – Графік залежності сили діючої на снаряд від часу

Залежність сили діючої на снаряд від часу (снаряд діаметром 7 мм) зображено на рисунку 39.

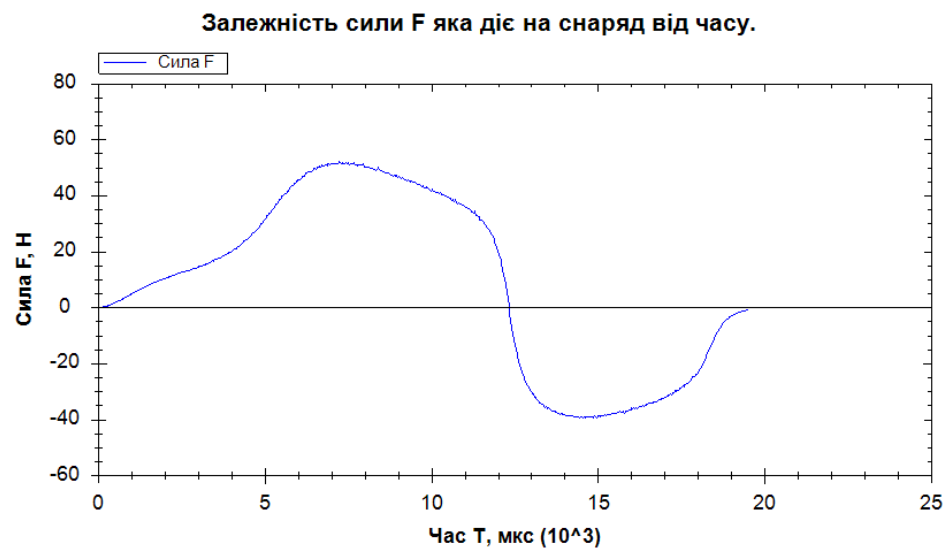


Рисунок 39 – Графік залежності сили діючої на снаряд від часу

### 9.3 Дослід третій

У даному досліді проводиться підбір оптимальної довжини котушки. Після проведених обчислень були отримані результати, які знаходяться у таблиці 11.

Таблиця 11 – Результати моделювання прискорення

Довжина котушки, мм	ККД системи, %	Енергія кулі, Дж	Швидкість кулі на виході з катушки, м/с
10	1,885	1,81	12,6812
20	1,905	1,829	12,748
30	1,511	1,451	11,35581
40	1,1498	1,149	10,106
50	0,973	0,934	9,111
60	0,811	0,779	8,322
70	0,706	0,678	7,764
80	0,644	0,618	7,413
90	0,604	0,579	7,177
100	0,577	0,554	7,02
110	0,565	0,542	6,944
120	0,554	0,532	6,875
130	0,535	0,514	6,757
140	0,526	0,505	6,703
150	0,528	0,507	6,715

Графік залежності ККД системи від довжини котушки зображено на

					ІА52.330БАК.005 ПЗ	Лист
	рисунку 40.					
Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

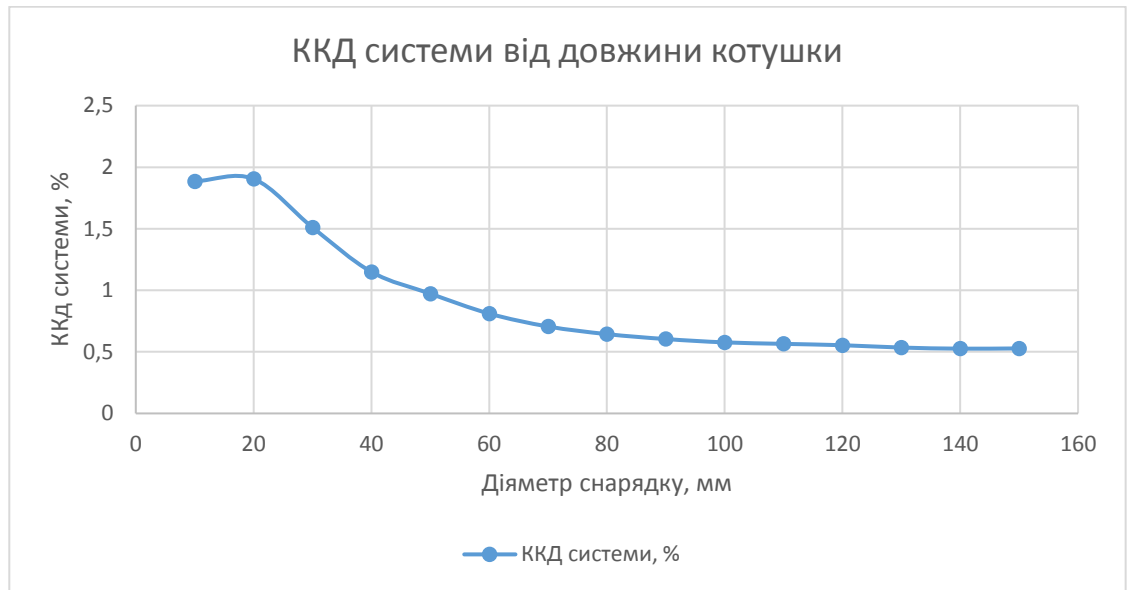


Рисунок 40 – Графік залежності ККД від довжини

Графік залежності енергії снаряду від довжини котушки зображено на рисунку 41.

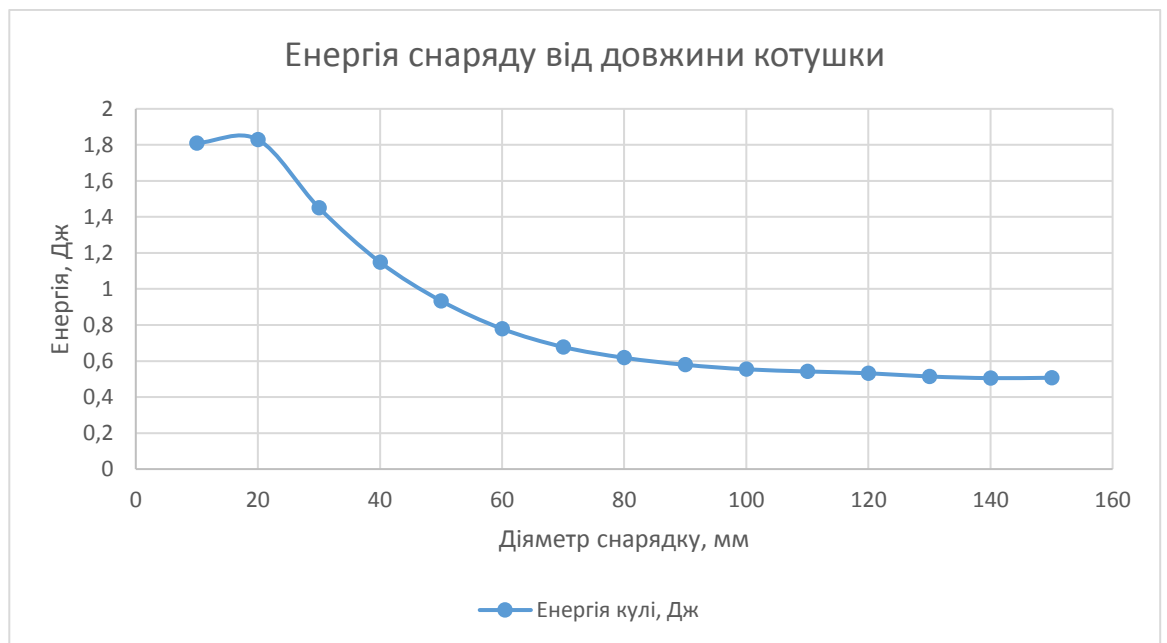


Рисунок 41 – Графік залежності

Графік залежності швидкості снаряду від довжини котушки зображено на рисунку 42.



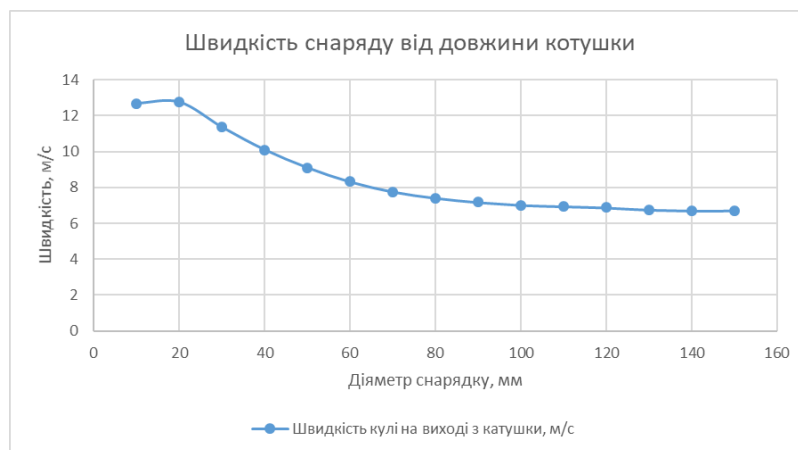


Рисунок 42 – Графік залежності швидкості від довжини

Як можна бачити, оптимальна по енергії та швидкості снаряду, а також ККД, є довжина котушки у 20 мм, оскільки така котушка має малий опір та малу довжину. За рахунок цього по ній може швидко пройти струм великої сили і магнітне поле від такого імпульсу буде сильним на кінцях котушки оскільки вони не так далеко від центру. Так, снаряд дуже швидко розганяється і завдяки малому опору, імпульс струму відбувається до того як снаряд перелетить через центр котушки, як ми можемо бачити це на рисунках 43 та 44.

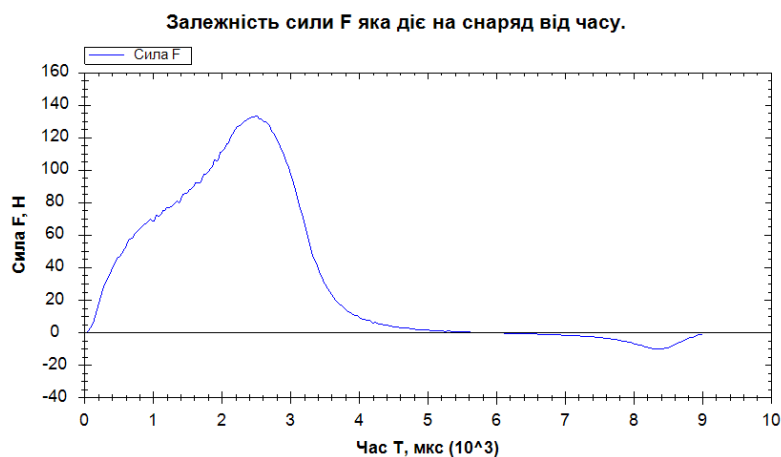


Рисунок 43 – Залежність сили, що діє на снаряд, від часу

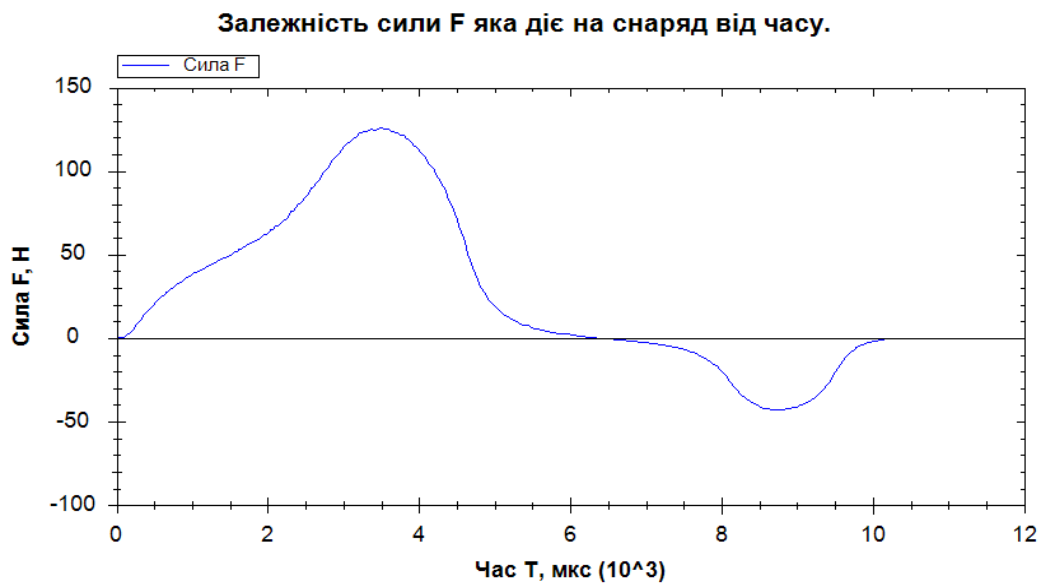


Рисунок 44 – Залежність сили яка діє на снаряд від часу, при довжині котушки у 20 мм

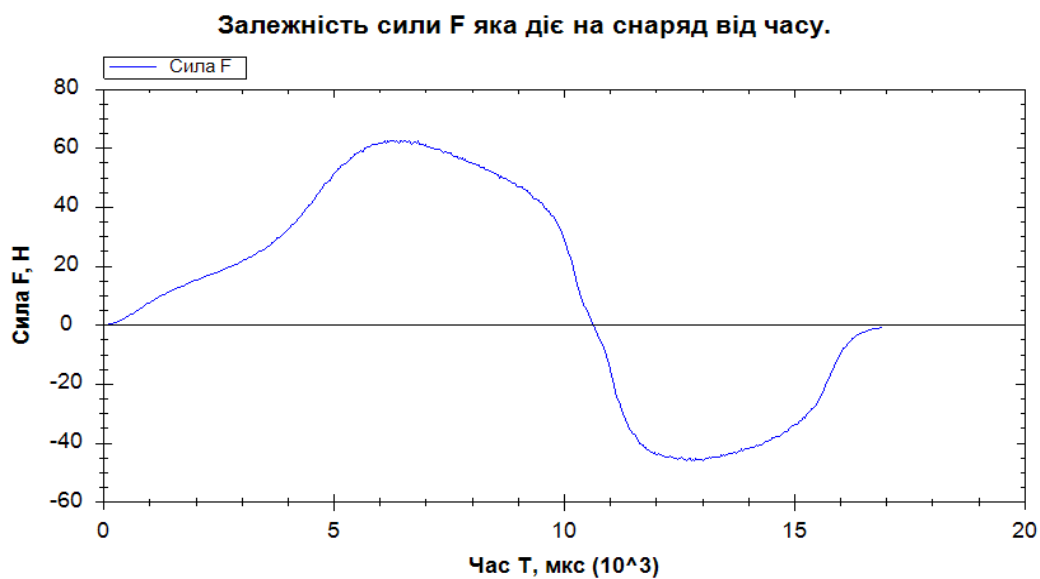


Рисунок 45 – Залежність сили яка діє на снаряд від часу, при довжині котушки у 60 мм

## ВИСНОВОК

У рамках розробки даного дипломного проекту була створена електрична схема та розроблено програмне забезпечення для моделювання електромагнітного прискорювача мас солейдного типу з снарядом сталі марки 1411. Метою розробки було дослідження процесів, які відбуваються у даному електромагнітному прискорювачі мас, підбір параметрів для максимізації ККД системи.

У ході виконання роботи була визначена область застосування установки та актуальність розробки, проаналізовано наявні рішення та вибрано найефективніший варіант.

Під час створення функціональної схеми були підібрані необхідні радіолелементи: конденсатори, діоди, котушка індуктивності, теристорний ключ та резистори. Під час розробки структурної схеми було визначено зв'язок між усіма елементами та вузлами.

Після цього було розроблено алгоритм роботи, що описує порядок роботи програми за допомогою блоків. Для зручності алгоритм зображено у вигляді блок-схем.

Висновком є те, що дана система попри велику кількість переваг має один значний недолік, такий як низький ККД. Для використання подібної установки у комерційних цілях необхідні велика ємність конденсаторів, малий супротив котушки та тонке калібрування параметрів системи в залежності від призначення.

					IA52.330БАК.005 ПЗ	Лист
Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

- 1) Електромагнітний прискорювач мас [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://ipt.kpi.ua/elektromagnitnij-priskoryuvach-mas>
- 2) Буль Б. К. Электромеханические аппараты автоматики / Б. К. Буль, О. Б. Буль, В. А. Азанов, В. Н. Шоффа. – М.: Высшая школа, 1988. – 303 с.
- 3) Иродов И. Е. Основные законы электромагнетизма. – М.: Высшая школа, 1991. – 289 с.
- 4) Миткевич В. Ф. Магнетизм и электричество. – М.: Ленанд, 2015. – 272 с.
- 5) Гармата Гауса [Електронний ресурс] – Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%B0%D1%80%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B0\\_%D0%93%D0%B0%D1%83%D1%81%D0%B0](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%B0%D1%80%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B0_%D0%93%D0%B0%D1%83%D1%81%D0%B0)
- 6) Космическая пушка [Електронний ресурс] – Режим доступу: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D1%81%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F\\_%D0%BF%D1%83%D1%88%D0%BA%D0%B0](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D1%81%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D0%BF%D1%83%D1%88%D0%BA%D0%B0)
- 7) Рейкотрон [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B5%D0%B9%D0%BA%D0%BE%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD>
- 8) Функціональні схеми автоматизації. Розробка та оформлення. Навчальний посібник [Текст] / Уклад.: Л. Ю. Юрчук, В. А. Жеребко. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 91 с.
- 9) Тиристор КУ202М [Електронний ресурс] – Режим доступу: [https://eandc.ru/catalog/index.php?SECTION\\_ID=185&ELEMENT\\_ID=10849](https://eandc.ru/catalog/index.php?SECTION_ID=185&ELEMENT_ID=10849)
- 10) Диод выпрямительный. Компактная конструкция. Модель 1N5408 [Текст]: листок-каталог: разработчик и изготовитель ZOWIE. – М.: 2018. – 8 с.
- 11) Конденсатор 680 мкФ 200 В 85°C. Компактная конструкция. [Текст]: листок-каталог: разработчик и изготовитель JAMICON. – В.: 2016. – 5 с.
- 12) Блок питания Sunny 12В 1А 2.1x5.5мм [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://arduino.ua/prod420-blok-pitaniya-sunny-12v-1a-2.1x5.5mm>

Код документа: 0051131a					Лист
Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	

- 13) DC-DC понижающий конвертер LM2596 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://arduino.ua/prod650-DC-DC-ponijaushhii-konverter-c-4-5-60V-do-3-35V>
- 14) Толок В. А. Метод конечных элементов: теория, алгоритмы, реализация. – К.: Наукова думка, 2003. – 316 с.
- 15) Метод скінчених елементів [Електронний ресурс] – Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4\\_%D1%81%D0%BA%D1%96%D0%BD%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D0%B8%D1%85\\_%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82%D1%96%D0%B2](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4_%D1%81%D0%BA%D1%96%D0%BD%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D0%B8%D1%85_%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82%D1%96%D0%B2)

					ІА52.330БАК.005 ПЗ	Лист
Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

## ДОДАТОК А

### Програмний код основної програми

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Diagnostics;
using System.Drawing;
using System.IO;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows.Forms;
using System.Runtime.Serialization.Json;
using System.Runtime.Serialization;
using System.Xml;
using System.Xml.Serialization;
using ZedGraph;

namespace Gauss
{
    public partial class Form1 : Form
    {
        public CounterInfo Contours = new CounterInfo();
        Graphics panelGraphics;
        static float panelMiddleY;
        int calcCounter = 0;

        public Form1()
        {
            InitializeComponent();
            panelGraphics = panel2.CreateGraphics();
            panelMiddleY = panel2.Height / 2;
        }

        public void AddCounter(float Capacitor_U, float Capacitor_C, float Coil_L, float
        Coil_D, float Wire_D, float WireIzolation_D, float MagWire_D, float Coil_Penetration, float
        Lenght_Between_Coils)
        {
            System.Windows.Forms.Label l = new System.Windows.Forms.Label();
            panel1.Controls.Add(l);
            l.AutoSize = false;
            l.Location = new Point(0, 0);
            l.Name = $"Contour";
            l.Size = new Size(panel1.Width, 30);
            l.TabIndex = 0;
            l.Text = $"Новий контур";
            l.TextAlign = ContentAlignment.MiddleCenter;
            l.BackColor = Color.FromArgb(100, 200, 150, 200);
            l.BorderStyle = BorderStyle.FixedSingle;
            l.DoubleClick += Contour_DoubleClick;
            Contours = new CounterInfo(Capacitor_U, Capacitor_C, Coil_L, Coil_D,
            Wire_D, WireIzolation_D, MagWire_D, Coil_Penetration, Lenght_Between_Coils, l);
        }
    }
}
```

IA52.330БАК.005 ПЗ					Лист
Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	

```

        //panel1.1.Add();
    }

    private void Contour_DoubleClick(object sender, EventArgs e)
    {
        Form2 f2 = new Form2();
        f2.setText(
            Contours.Capasitor_U.ToString(),
            Contours.Capasitor_C.ToString(),
            Contours.Coil_L.ToString(),
            Contours.Coil_D.ToString(),
            Contours.MagWire_D.ToString(),
            Contours.Wire_D.ToString(),
            Contours.WireIzolation_D.ToString(),
            Contours.Coil_Penetration.ToString()
        );
        f2.Show();
    }

    private void Form1_Load(object sender, EventArgs e)
    {
        textBox1.Text = "0,01";
        textBox2.Text = "0,009";
        textBox3.Text = "0,1";
        textBox4.Text = "10";
    }

    private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        Form2 CountorForm = new Form2();
        CountorForm.Show();
    }

    private void button3_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        exp();
    }

    private void Process_Exited(object sender, EventArgs e)
    {
        MessageBox.Show("Розрахунки завершились!");
    }

    private void drawBarrel(float barrel_R)
    {
        panelGraphics.FillRectangle(new SolidBrush(Color.FromArgb(150, 100, 100, 100)), 30, panel2.Height / 2 - barrel_R, panel2.Width - 60, barrel_R * 2);
    }

    private void drawBullet(float bullet_L, float bullet_R)
    {
        panelGraphics.DrawPolygon(
            new Pen(Color.FromArgb(0, 0, 255)),
            new Point[] {
                new Point(30, panelMiddleY - bullet_R),
                new Point(30, panelMiddleY + bullet_R),
                new Point(panel2.Width - 60, panelMiddleY + bullet_R),
                new Point(panel2.Width - 60, panelMiddleY - bullet_R),
                new Point(30, panelMiddleY - bullet_R)
            }
        );
    }

```

		new Point[] {	ІА52.330БАК.005 ПЗ			Лист
		new Point(30, panelMiddleY - bullet_R),				
Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

```

        new PointF(30+bullet_L-bullet_L/5,panelMiddleY - bullet_R),
        new PointF(30+bullet_L,panelMiddleY),
        new PointF(30+bullet_L-bullet_L/5,panelMiddleY + bullet_R),
        new PointF(30,panelMiddleY + bullet_R),
    });
}
private void drawFirstCoil(float coil_L, float coil_R, float barrel_R, float bullet_L,
float penetration)
{
    panelGraphics.DrawRectangle(
        new Pen(Color.Brown),
        30 + bullet_L - penetration,
        panelMiddleY - coil_R,
        coil_L,
        coil_R - barrel_R
    );
    panelGraphics.DrawRectangle(
        new Pen(Color.Brown),
        30 + bullet_L - penetration,
        panelMiddleY + barrel_R,
        coil_L,
        coil_R - barrel_R
    );

}
private void exit_Click(object sender, EventArgs e)
{
    Application.Exit();
}
private void openFile_Click(object sender, EventArgs e)
{
    OpenFileDialog ofd = new OpenFileDialog();
    ofd.Filter = "Xml files(*.xml)|*.xml";

    //Якщо натиснута кнопка відміни, то, ніяких дій не виконується.
    if (ofd.ShowDialog() == DialogResult.Cancel)
    {
        return;
    }

    //Створення текстового поля для відображення інформації.
    System.Windows.Forms.Label infoLabel = new
System.Windows.Forms.Label();
    infoLabel.AutoSize = false;
    infoLabel.Location = new System.Drawing.Point(9, 7);
    infoLabel.Name = "InfoLabel";
    infoLabel.Size = new System.Drawing.Size(274, 534);
    infoLabel.TabIndex = 1;
    infoLabel.Text = "";

    //Створення області для графіку.
    ZedGraphControl graphArea = new ZedGraphControl();
    graphArea.Visible = false;
    graphArea.Location = new System.Drawing.Point(289, 46);
    graphArea.Name = "graphArea";

```

					Лист
Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	



```

graphArea.ScrollGrace = 0D;
graphArea.ScrollMaxX = 0D;
graphArea.ScrollMaxY = 0D;
graphArea.ScrollMaxY2 = 0D;
graphArea.ScrollMinX = 0D;
graphArea.ScrollMinY = 0D;
graphArea.ScrollMinY2 = 0D;
graphArea.Size = new System.Drawing.Size(837, 495);
graphArea.TabIndex = 0;
graphArea.UseExtendedPrintDialog = true;

```

//Створення кнопок для перегляду даних розрахунків на графіку.

//Координата X від часу.

```

Button t_x = new Button();
t_x.Location = new System.Drawing.Point(290, 7);
t_x.Name = "t_x";
t_x.Size = new System.Drawing.Size(108, 33);
t_x.TabIndex = 2;
t_x.Text = "Кордината X";
t_x.UseVisualStyleBackColor = true;
t_x.Click += new System.EventHandler(graph_Click);

```

//Струм I від часу.

```

Button t_i = new Button();
t_i.Location = new System.Drawing.Point(404, 6);
t_i.Name = "t_i";
t_i.Size = new System.Drawing.Size(99, 33);
t_i.TabIndex = 3;
t_i.Text = "Струм I";
t_i.UseVisualStyleBackColor = true;
t_i.Click += new System.EventHandler(graph_Click);

```

//Сила F від часу.

```

Button t_f = new Button();
t_f.Location = new System.Drawing.Point(509, 7);
t_f.Name = "t_f";
t_f.Size = new System.Drawing.Size(80, 33);
t_f.TabIndex = 2;
t_f.Text = "Сила F";
t_f.UseVisualStyleBackColor = true;
t_f.Click += new System.EventHandler(graph_Click);

```

//Швидкість V від часу.

```

Button t_v = new Button();
t_v.Location = new System.Drawing.Point(595, 6);
t_v.Name = "t_v";
t_v.Size = new System.Drawing.Size(140, 33);
t_v.TabIndex = 2;
t_v.Text = "Швидкість снаряду V";
t_v.UseVisualStyleBackColor = true;
t_v.Click += new System.EventHandler(graph_Click);

```

//Індукція B від часу.

```

Button t_b = new Button();

```

IA52.330БАК.005 ПЗ

Лист

Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	
------	------	----------	--------	------	--

```

t_b.Location = new System.Drawing.Point(741, 7);
t_b.Name = "t_b";
t_b.Size = new System.Drawing.Size(191, 33);
t_b.TabIndex = 2;
t_b.Text = "Індукція В в середині снаряду";
t_b.UseVisualStyleBackColor = true;
t_b.Click += new System.EventHandler(graph_Click);

//Створення нової вкладки для відображення результатів
CustomTabPage tcp = new CustomTabPage(ofd.FileName);
infoLabel.Text = tcp.InfoLabelText;
tcp.Controls.Add(infoLabel);
tcp.Controls.Add(graphArea);
tcp.Controls.Add(t_x);
tcp.Controls.Add(t_i);
tcp.Controls.Add(t_f);
tcp.Controls.Add(t_v);
tcp.Controls.Add(t_b);
tcp.gp = graphArea.GraphPane;
tcp.Location = new System.Drawing.Point(4, 22);
tcp.Name = $"ResultPage{tabControl1.TabCount - 1}";
tcp.Padding = new System.Windows.Forms.Padding(3);
tcp.Size = new System.Drawing.Size(1135, 550);
tcp.TabIndex = 1;
tcp.Text = $"Сторінка результатів {tabControl1.TabCount}";
tcp.UseVisualStyleBackColor = true;

tabControl1.Controls.Add(tcp);
}
private void graph_Click(object sender, EventArgs e)
{
    int infoState = 0;
    string infoText;
    String mainTitle = "";
    string YTitle = "";
    string XTitle = "Час Т, мкс";
    Button thisButton = (Button)sender;
    infoText = thisButton.Text;
    CustomTabPage ctp = (CustomTabPage)thisButton.Parent;
    ctp.gp.CurveList.Clear();
    PointPairList ppl = new PointPairList();
    switch (thisButton.Name)
    {
        case "t_x":
            infoState = 1;
            YTitle = "Координата Х";
            mainTitle = "Залежність координати снаряду від часу.";
            break;
        case "t_i":
            infoState = 2;
            YTitle = "Струм І, А";
            mainTitle = "Залежність струму І котушки від часу.";
            break;
        case "t_f":
            infoState = 3;
            YTitle = "Частота f, Гц";
            mainTitle = "Залежність частоти f від часу.";
            break;
    }
    infoLabel.Text = infoText;
    infoLabel.Visible = true;
    YLabel.Visible = true;
    XLabel.Visible = true;
    YTitleLabel.Visible = true;
    XTitleLabel.Visible = true;
    mainTitleLabel.Visible = true;
    ctp.gp.CurveList.Clear();
    ppl.Add(0, 0);
    ppl.Add(100, 100);
    ppl.Add(200, 200);
    ppl.Add(300, 300);
    ppl.Add(400, 400);
    ppl.Add(500, 500);
    ppl.Add(600, 600);
    ppl.Add(700, 700);
    ppl.Add(800, 800);
    ppl.Add(900, 900);
    ppl.Add(1000, 1000);
    ctp.gp.CurveList.Add(ppl);
    ctp.gp.Refresh();
}

```

			case "t_f":		ІА52.330БАК.005 ПЗ	Лист
			infoState = 3;			
Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

```

        YTitle = "Сила F, Н";
        mainTitle = "Залежність сили F яка діє на снаряд від часу.";
        break;
    case "t_v":
        infoState = 4;
        YTitle = "Швидкість снаряду V, м/с";
        mainTitle = "Залежність швидкості снаряду V від часу.";
        break;
    case "t_b":
        infoState = 5;
        YTitle = "Індукція снаряду B, Тл";
        mainTitle = "Залежність індукції B в центрі снаряду від часу.";
        break;
    }
    for (int i = 0; i < ctp.dataArray.GetLength(0); i++)
    {
        ppl.Add(ctp.dataArray[i, 0], ctp.dataArray[i, infoState]);
    }
    ctp.gp.AddCurve(infoText, ppl, Color.Blue, SymbolType.None);
    ctp.gp.XAxis.Title.Text = XTitle;
    ctp.gp.YAxis.Title.Text = YTitle;
    ctp.gp.Title.Text = mainTitle;
    ZedGraphControl zgc = (ZedGraphControl)ctp.Controls.Find("graphArea",
false)[0];

    zgc.Visible = true;
    zgc.AxisChange();
    zgc.Invalidate();
    //ctp.
}
private void openAbout(object sender, EventArgs e)
{
    Form3 f3 = new Form3();
    f3.Show();
}

private void exp()
{
    float a = -50;
    for (int i = 0; i < 151; i+=10)
    {
        if(i == 0)
        {
            continue;
        }
        Process p = new Process();
        ProcessStartInfo psi = new ProcessStartInfo("GausCalculations.exe", $" {i}
1200|400|0.5|0.001|75|26|{i}|7|-5|8|0.1|30");
        psi.UseShellExecute = false;
        psi.CreateNoWindow = true;
        p.StartInfo = psi;
        p.Start();
    }
}
}

```

					IA52.330БАК.005 ПЗ	Лист
		[Serializable]				
Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

```

public class SimulationData
{
    public string Start_Sim;
    public string End_Sim;
    public float Capasitor_U;
    public float Capasitor_C;
    public float Coil_Lenght;
    public float Coil_D;
    public float Wire_D;
    public float WireIzolation_D;
    public float MagWire_D;
    public float Bullet_L;
    public float Bullet_D;
    public float Coil_Penetration;
    public float Barrel_D;
    public float Delta_T;
    public float Bullet_V0;
    public float General_Resistance;
    public float Outer_Resistance;
    public float Coil_Resistance;
    public float Coil_Turns;
    public float CoilWire_L;
    public float CoilWithBullet_Ind;
    public float Time;
    public float Bullet_M;
    public float Bullet_E_FromCoil;
    public float Bullet_E;
    public float Capacitor_E;
    public float Efficiency;
    public float Bullet_V;
    public float Bullet_Vmax;
    public string[] Data;
}

public partial class Form2 : Form
{
    public Form2()
    {
        InitializeComponent();
    }

    public void setText(string Capasitor_U, string Capasitor_C, string Coil_L, string
    Coil_D, string MagWire_D, string Wire_D, string WireIzolation_D, string Coil_Penetration)
    {
        textBox1.Text = Capasitor_U;
        textBox2.Text = Capasitor_C;
        textBox3.Text = Coil_L;
        textBox4.Text = Coil_D;
        textBox5.Text = MagWire_D;
        textBox6.Text = Wire_D;
        textBox7.Text = WireIzolation_D;
        textBox8.Text = Coil_Penetration;
    }

    private void Form2_Load(object sender, EventArgs e)
    {
        textBox9.Visible = false;
    }
}

```

						Лист
					IA52.330БАК.005 ПЗ	
Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

```

        label9.Visible = false;
        textBox1.Text = "400";
        textBox2.Text = "1200";
        textBox3.Text = "0,1";
        textBox4.Text = "0,025";
        textBox5.Text = "0";
        textBox6.Text = "0,001";
        textBox7.Text = "0,00001";
        textBox8.Text = "-0,02";
        textBox9.Text = "0";
    }

    private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        Program.MainForm.AddCountor(
            Capasitor_U: Convert.ToSingle(textBox1.Text),
            Capasitor_C: Convert.ToSingle(textBox2.Text),
            Coil_L: Convert.ToSingle(textBox3.Text),
            Coil_D: Convert.ToSingle(textBox4.Text),
            MagWire_D: Convert.ToSingle(textBox5.Text),
            Wire_D: Convert.ToSingle(textBox6.Text),
            WireIzolation_D: Convert.ToSingle(textBox7.Text),
            Coil_Penetration: (textBox8.Text.StartsWith("-")) ? -
Convert.ToSingle(textBox8.Text.Remove(0, 1)) : Convert.ToSingle(textBox8.Text),
            Lenght_Between_Coils: Convert.ToSingle(textBox9.Text));
        Hide();
    }
}

public class CountorInfo
{
    public float Capasitor_U;
    public float Capasitor_C;
    public float Coil_L;
    public float Coil_D;
    public float Wire_D;
    public float WireIzolation_D;
    public float MagWire_D;
    public float Coil_Penetration;
    public float Lenght_Between_Coils;
    public Label ContourLabel;

    public CountorInfo()
    {

    }

    public CountorInfo(float Capasitor_U, float Capasitor_C, float Coil_L, float
Coil_D, float Wire_D, float WireIzolation_D, float MagWire_D, float Coil_Penetration, float
Lenght_Between_Coils, Label label)
    {
        this.Capasitor_U = Capasitor_U;
        this.Capasitor_C = Capasitor_C;
        this.Coil_L = Coil_L;
        this.Coil_D = Coil_D;
        this.Wire_D = Wire_D;
    }
}

```

					Лист
Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	

```

        this.WireIzolation_D = WireIzolation_D;
        this.MagWire_D = MagWire_D;
        this.Coil_Penetration = Coil_Penetration;
        this.Lenght_Between_Coils = Lenght_Between_Coils;
        this.ContourLabel = label;
    }
}
public partial class Form3 : Form
{
    public Form3()
    {
        InitializeComponent();

        private void Form3_Load(object sender, EventArgs e)
        {
            label1.Text = "Дана програма побудована за допомогою FEMM 4.2, з метою
розрахунків одноступінчатого електромагнітного прискорювача мас. Щоб виконати
розрахунок будь ласка заповніть необхідні поля параметрів кулі, стоволу та часу. Додайте
контур також заповнивши всі необхідні поля та натисніть \"Зберегти\". Далі натисніть
\"Розрахувати\", зачекайте поки розрахунки завершаться та відкрийте їх для перегляду
результатів. Усі дробні числа вводити через кому!";
        }
    }
}
class CustomTabPage : TabPage
{
    SimulationData sd;
    public float[,] dataArray;
    string fileName;
    public string InfoLabelText { get; private set; }
    public GraphPane gp { get; set; }
    public CustomTabPage(string file) : base()
    {
        fileName = file;
        XmlDocument xd = new XmlDocument();
        XmlSerializer formatter = new XmlSerializer(typeof(SimulationData));
        string s = File.ReadAllText(fileName);
        string _byteOrderMarkUtf8 =
Encoding.UTF8.GetString(Encoding.UTF8.GetPreamble());
        if (s.StartsWith(_byteOrderMarkUtf8))
        {
            s = s.Replace(_byteOrderMarkUtf8, string.Empty);
            xd.LoadXml(s);
            xd.Save(fileName);
        }
        using (FileStream fs = File.Open(fileName, FileMode.Open))
        {
            sd = (SimulationData)formatter.Deserialize(fs);
        }
        StringBuilder sb = new StringBuilder();
        sb.Append($"Початок симуляції {sd.Start_Sim}\n");
        sb.Append($"Напруга на конденсаторах {sd.Capasitor_U} В\n");
        sb.Append($"Ємність конденсаторів {sd.Capasitor_C * 1000000} vrФ\n");
        sb.Append($"Енергія конденсаторів {sd.Capasitor_E} Дж\n");
        sb.Append($"Довжина котушки {sd.Coil_Lenght * 1000} мм\n");
    }
}

```

					Лист
Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	

```

sb.Append($"Зовнішній діаметр котушки {sd.Coil_D * 1000} мм\n");
sb.Append($"Діаметр обмоточного дроту котушки {sd.Wire_D * 1000}
мм\n");
sb.Append($"Подвійна товщина ізоляції дроту {sd.WireIzolation_D * 1000}
мм\n");
sb.Append($"Товщина зовнішнього магнітопроводу {sd.MagWire_D *
1000} мм\n");
sb.Append($"Довжина кулі {sd.Bullet_L * 1000} мм\n");
sb.Append($"Діаметр кулі {sd.Bullet_D * 1000} мм\n");
sb.Append($"Відстань на яку куля вдвинута в котушку {sd.Coil_Penetration
* 1000} мм\n");
sb.Append($"Зовнішній діаметр стволу {sd.Barrel_D * 1000} мм\n");
sb.Append($"Кількість витків в котушці {sd.Coil_Turns}\n");
sb.Append($"Супротив котушки {sd.Coil_Resistance} Ом\n");
sb.Append($"Довжина проводу в котушці {sd.CoilWire_L} М\n");
sb.Append($"Індуктивність котушки з кулею в початковому положенні
{sd.CoilWithBullet_Ind} мкГн\n");
sb.Append($"Час процесу {sd.Time * 1000000} мкс\n");
sb.Append($"Маса кулі {sd.Bullet_M} г\n");
sb.Append($"Енергія кулі {sd.Bullet_E} Дж\n");
sb.Append($"ККД системи {sd.Efficiency} %\n");
sb.Append($"Швидкість кулі на виході з катушки {sd.Bullet_V} м/с\n");
sb.Append($"Максимальна швидкість яка була досягнута у розрахунку
{sd.Bullet_Vmax} м/с\n");
InfoLabelText = sb.ToString();
dataArray = new float[sd.Data.Length, 6];
for (int i = 0; i < sd.Data.Length; i++)
{
    string[] tempData = sd.Data[i].Split(new string[] { "|" },
StringSplitOptions.RemoveEmptyEntries);
    dataArray[i, 0] = Convert.ToSingle(tempData[0].Replace(".", ","));
    dataArray[i, 1] = Convert.ToSingle(tempData[1].Replace(".", ","));
    dataArray[i, 2] = Convert.ToSingle(tempData[2].Replace(".", ","));
    dataArray[i, 3] = Convert.ToSingle(tempData[3].Replace(".", ","));
    dataArray[i, 4] = Convert.ToSingle(tempData[4].Replace(".", ","));
    dataArray[i, 5] = Convert.ToSingle(tempData[5].Replace(".", ","));
}

}

public float this[int i, int j] {
    get {
        return dataArray[i, j];
    }
    private set {
        dataArray[i, j] = value;
    }
}

}

}

```

## ДОДАТОК Б

### Програмний код допоміжної програми

```
namespace GausCalculations
{
    class Program
    {
        static void Main(string[] args)
        {
            Console.WriteLine("Будь ласка зачекайте поки виконуються розрахунки.");
            string cd = Directory.GetCurrentDirectory();
            string simulationDir = $"{cd}\\TempFemmGausSimulationDirectory{args[0]}";
            string cdscrip = simulationDir + $"\\FemmGausScript{args[0]}.lua";
            Directory.CreateDirectory($"{cd}\\TempFemmGausSimulationDirectory{args[0]}");
            string[] scriptParameters = {
                "<%CAPASITOR_C%>",
                "<%CAPASITOR_U%>",
                "<%WIRE_D%>",
                "<%WIRE_R%>",
                "<%COIL_L%>",
                "<%COIL_D%>",
                "<%BULLET_L%>",
                "<%BULLET_D%>",
                "<%COIL_Penetration%>",
                "<%BARREL_D%>",
                "<%BULLET_V%>",
                "<%TIME_Inc%>"
            };
            string[] argParameters = args[1].Split(new string[] { "|" }, StringSplitOptions.RemoveEmptyEntries);
            string script = File.ReadAllText($"{cd}\\Script.txt");
```

ІА52.330БАК.005 ПЗ

Лист

Ізм.

Лист

№ докум.

Підпис

Дата



```

for (int i = 0; i < scriptParameters.Length; i++)
{
    script = script.Replace(scriptParameters[i],argParameters[i]);
}
script = script.Replace("<%PROCESS_Path%>", $"\"{simulationDir.Replace("\\", "/")}\"");
script = script.Replace("<%PROCESS_ID%>", args[0]);
FileStream fs = File.Create(cdscript);
fs.Close();
File.WriteAllText(cdscript, script);
Type femm = Type.GetTypeFromProgID("femm.ActiveFEMM");
dynamic femmInst = Activator.CreateInstance(femm);
string msg = femmInst.call2femm($"dofile(\"{cdscript}\").Replace("\\", "/");");
}
}
}

```

## ДОДАТОК В

### Програмний код скрипта для розрахунку

```

setcompatibilitymode(1)
Pp = <%PROCESS_Path%>
Pid = <%PROCESS_ID%>
C = <%CAPASITOR_C%>
U = <%CAPASITOR_U%>
Dpr = <%WIRE_D%>
Tiz = <%WIRE_R%>
Lkat = <%COIL_L%>
Dkat = <%COIL_D%>
Lmag = 0--<%MAGNET_R%>
Lpuli = <%BULLET_L%>
Dpuli = <%BULLET_D%>
Lsdv = <%COIL_Penetration%>
Dstvola = <%BARREL_D%>
Vel0 = <%BULLET_V%>
delta_t = <%TIME_Inc%>
Nsk = 1
DpuliV = 0
kRC = 140
Rcc = (kRC/C)
Rv = 0.35+Rcc
Coil_meshsize = (Dkat/2-Dstvola/2)/4
Proj_meshsize = Dpuli/8
max_segm = 5
t = 0
sigma = 0.0000000175
ro = 7800
pi = 3.1415926535
Start_date= date()
create(0)
mi_probdef(0,"millimeters","axi",1E-8,30)

```

```
mi_addmaterial("Al",1,1)
```

```
mi_addmaterial("Cu",1,1,"", "", "",58,"", "", "",4,"", "",1,Dpr)
```

IA52.330БАК.005 ПЗ

					Лист
Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	

```

mi_addcircprop("katushka",0,0,1)
mi_addboundprop ("pbc",0,0,0,0,0,0,0,4)
mi_addmaterial('P',"",",",",",0)
mi_addbhpoint('P',0,0)
mi_addbhpoint('P',0.400000005960464,140)
mi_addbhpoint('P',0.5,171)
mi_addbhpoint('P',0.600000023841858,211)
mi_addbhpoint('P',0.699999988079071,261)
mi_addbhpoint('P',0.800000011920929,318)
mi_addbhpoint('P',0.899999976158142,397)
mi_addbhpoint('P',1,502)
mi_addbhpoint('P',1.10000002384186,647)
mi_addbhpoint('P',1.20000004768372,843)
mi_addbhpoint('P',1.29999995231628,1140)
mi_addbhpoint('P',1.39999997615814,1580)
mi_addbhpoint('P',1.5,2500)
mi_addbhpoint('P',1.60000002384186,4370)
mi_addbhpoint('P',1.70000004768372,7780)
mi_addbhpoint('P',1.79999995231628,12800)
mi_addbhpoint('P',1.89999997615814,19700)
mi_addbhpoint('P',2,31000)
mi_addbhpoint('P',2.09999990463257,65500)
mi_addbhpoint('P',2.2,144000)
mi_addbhpoint('P',2.3,224000)
mi_addbhpoint('P',2.4,304000)
mi_addbhpoint('P',2.5,384000)
mi_addmaterial('M',"",",",",",0)
mi_addbhpoint('M',0,0)
mi_addbhpoint('M',0.400000005960464,140)
mi_addbhpoint('M',0.5,171)
mi_addbhpoint('M',0.600000023841858,211)
mi_addbhpoint('M',0.699999988079071,261)
mi_addbhpoint('M',0.800000011920929,318)
mi_addbhpoint('M',0.899999976158142,397)
mi_addbhpoint('M',1,502)
mi_addbhpoint('M',1.10000002384186,647)
mi_addbhpoint('M',1.20000004768372,843)
mi_addbhpoint('M',1.29999995231628,1140)
mi_addbhpoint('M',1.39999997615814,1580)
mi_addbhpoint('M',1.5,2500)
mi_addbhpoint('M',1.60000002384186,4370)
mi_addbhpoint('M',1.70000004768372,7780)
mi_addbhpoint('M',1.79999995231628,12800)
mi_addbhpoint('M',1.89999997615814,19700)
mi_addbhpoint('M',2,31000)
mi_addbhpoint('M',2.09999990463257,65500)
mi_addbhpoint('M',2.2,144000)
mi_addbhpoint('M',2.3,224000)
mi_addbhpoint('M',2.4,304000)
mi_addbhpoint('M',2.5,384000)
mi_saveas (Pp .. "/GaussCalc" .. Pid .. ".fem")
mi_addnode(0,Lkat + Dkat + Lmag + Lpuli - Lsdv)
mi_addnode(0,(Lkat + Dkat + Lmag + Lpuli - Lsdv)*-1)
mi_addsegment(0,(Lkat + Dkat + Lmag + Lpuli - Lsdv)*-1,0,Lkat + Dkat + Lmag + Lpuli -
Lsdv)
mi_addarc(0,(Lkat + Dkat + Lmag + Lpuli - Lsdv)*-1,0,Lkat + Dkat + Lmag + Lpuli -
Lsdv,180,max_segm)
mi_addblocklabel((Lkat + Dkat + Lmag + Lpuli - Lsdv)*0.7,0)

```

		mi_clearselected()			Лист
		mi_selectlabel((Lkat + Dkat + Lmag + Lpuli - Lsdv)*0.7,0)			
Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	ІА52.330.005 ПЗ



```

mi_selectnode(Dstvola/2,-Lkat/2)
mi_selectnode(Dkat/2,Lkat/2)
mi_selectnode(Dkat/2,-Lkat/2)
mi_setnodeprop("",2)
mi_addblocklabel(Dstvola/2+(Dkat/2-Dstvola/2)/2,0)
mi_clearselected()
mi_selectlabel(Dstvola/2+(Dkat/2-Dstvola/2)/2,0)
mi_setblockprop("Cu", 0, Coil_meshsize, "katushka", "",2)
if Lmag > 0 then
mi_addnode(Dstvola/2,Lkat/2+Lmag)
mi_addnode(Dkat/2+Lmag,Lkat/2+Lmag)
mi_addnode(Dkat/2+Lmag,-Lkat/2-Lmag)
mi_addnode(Dstvola/2,-Lkat/2-Lmag)
mi_addsegment(Dstvola/2,Lkat/2,Dstvola/2,Lkat/2+Lmag)
mi_addsegment(Dstvola/2,Lkat/2+Lmag,Dkat/2+Lmag,Lkat/2+Lmag)
mi_addsegment(Dkat/2+Lmag,Lkat/2+Lmag,Dkat/2+Lmag,-Lkat/2-Lmag)
mi_addsegment(Dkat/2+Lmag,-Lkat/2-Lmag,Dstvola/2,-Lkat/2-Lmag)
mi_addsegment(Dstvola/2,-Lkat/2-Lmag,Dstvola/2,-Lkat/2)
mi_addblocklabel(Dkat/2+Lmag/2,0)
mi_clearselected()
mi_selectlabel(Dkat/2+Lmag/2,0)
mi_setblockprop("M", 1, "", "", "",3)
end
mi_clearselected()
C = C/1000000
Dpriz = Dpr+Tiz
Dpr = Dpr/1000
Dpriz = Dpriz/1000
Lpuli = Lpuli/1000
Dpuli = Dpuli/1000
Dstvola = Dstvola/1000
Lkat = Lkat/1000
Dkat = Dkat/1000
Lsdv = Lsdv/1000
Lmag = Lmag/1000

mi_analyze(1)
mi_loadsolution()

mo_groupselectblock(2)
Skat = mo_blockintegral(5)
Vkat = mo_blockintegral(10)
mo_clearblock()
mo_groupselectblock(1)
Vpuli = mo_blockintegral(10)
mo_clearblock()

Mpuli=ro*Vpuli
N=Skat*0.94/(Dpriz*Dpriz)
DLprovoda=N * 2 * pi * (Dkat + Dstvola)/4

Rkat=(sigma*DLprovoda/(pi*(Dpr/2)^2))/Nsk/Nsk
R=Rv+Rkat

mi_clearselected()
mi_selectlabel(Dstvola*1000/2+(Dkat/2-Dstvola/2)*1000/2,0)
mi_setblockprop("Cu", 0, Coil_meshsize, "katushka", "",2,N)
mi_clearselected()

```

```
mi_modifyncprop("katushka",1,100)
```

IA52.330БАК.005 ПЗ

Лист

Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

```

mi_analyze(1)
mo_reload()
current_re,current_im,volts_re,volts_im,flux_re,flux_im=mo_getcircuitproperties("katushka")

L=flux_re/current_re

dt = delta_t/1000000
x=0
I0=0.0001
t=0
Vel=Vel0
Vmax=Vel
Uc = U
I=I0
Force = 0
Fii = 0
Fix = 0
KC=1
T_I={}
T_F={}
T_Vel={}
T_x={}
T_B={}
T_t={}
Pricina=""
repeat

t = t+dt

mi_modifycircprop("katushka",1,I/Nsk)
mi_analyze(1)
mo_reload()
mo_groupselectblock(1)
Force = mo_blockintegral(19)
Force=Force*-1

current_re,current_im,volts_re,volts_im,flux_re,flux_im=mo_getcircuitproperties("katushka")
Fi0=flux_re
mi_modifycircprop("katushka",1,I*1.0001/Nsk)
mi_analyze(1)
mo_reload()
current_re,current_im,volts_re,volts_im,flux_re,flux_im=mo_getcircuitproperties("katushka")

Fi1=flux_re
Fii=(Fi1-Fi0)/(0.0001*I)

apuli = Force / Mpuli
dx = Vel*dt+apuli*dt*dt/2
x = x+dx
Vel = Vel+apuli*dt
if Vmax<Vel then Vmax=Vel end
mi_selectgroup(1)
mi_movetranslate(0,-dx*1000)

Are,Aim,B1re,B1m,B2re=mo_getpointvalues(Dpuli/4,Lkat/2+Lpuli/2-Lsdv+x)

Fix= Force/I

```

		I=I+dt*(Uc-I*R-Fix*Vel)/Fi	IA52.330БАК.005 ПЗ		Лист
Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	

Uc = Uc-dt\*I/C

Pricina = ""

if x > (Lpuli+Lkat-Lsdv) and abs(Force) < 1 then  
break  
end

if x < 0 then  
break  
end

if Vel < 0 then  
break  
end

T\_I[KC]=I

T\_F[KC]=Force

T\_Vel[KC]=Vel

T\_x[KC]=x\*1000

T\_t[KC]=t\*1000000

T\_t[KC]=t\*1000000

T\_B[KC]=B2re

KC=KC+1

until I<0 and Uc<0

Epuli = (Mpuli\*Vel^2)/2 - (Mpuli\*Vel0^2)/2

Epuli\_all = (Mpuli\*Vel^2)/2

EC= (C\*U^2)/2

KPD = Epuli\*100/EC

handle = openfile(Pp .. "/Data" .. Pid .. ".xml",'a')

xmlIntro = "<?xml version='1.0'?">\n<SimulationData  
xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"  
xmlns:xsd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema">

write(handle,xmlIntro ,"\n")  
write(handle,"<Start\_Sim>",Start\_date,"</Start\_Sim>\n")  
write(handle,"<End\_Sim>",date(),"</End\_Sim>\n")  
write(handle,"<Capasitor\_U>",U,"</Capasitor\_U>\n")  
write(handle,"<Capasitor\_C>",C,"</Capasitor\_C>\n")  
write(handle,"<Coil\_Lenght>",Lkat,"</Coil\_Lenght>\n")  
write(handle,"<Coil\_D>",Dkat,"</Coil\_D>\n")  
write(handle,"<Wire\_D>",Dpr,"</Wire\_D>\n")  
write(handle,"<WireIzolation\_D>",Tiz,"</WireIzolation\_D>\n")  
write(handle,"<MagWire\_D>",Lmag,"</MagWire\_D>\n")  
write(handle,"<Bullet\_L>",Lpuli,"</Bullet\_L>\n")  
write(handle,"<Bullet\_D>",Dpuli,"</Bullet\_D>\n")  
write(handle,"<Coil\_Penetration>",Lsdv,"</Coil\_Penetration>\n")  
write(handle,"<Barrel\_D>",Dstvola,"</Barrel\_D>\n")

write(handle,"<Delta\_T>",delta\_t,"</Delta\_T>\n")

write(handle,"<Bullet\_V0>",Vel0,"</Bullet\_V0>\n")

PA52.330БАК.005 ПЗ

		write(handle,"<Delta_T>",delta_t,"</Delta_T>\n")			Лист
		write(handle,"<Bullet_V0>",Vel0,"</Bullet_V0>\n")			
Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	

```

write(handle,"<General_Resistance>",R,"</General_Resistance>\n")
write(handle,"<Outer_Resistance>",Rv,"</Outer_Resistance>\n")
write(handle,"<Coil_Resistance>",Rkat,"</Coil_Resistance>\n")
write(handle,"<Coil_Turns>",N,"</Coil_Turns>\n")
write(handle,"<CoilWire_L>",DLprovoda,"</CoilWire_L>\n")
write(handle,"<CoilWithBullet_Ind>",L,"</CoilWithBullet_Ind>\n")
write(handle,"<Time>",t,"</Time>\n")
write(handle,"<Bullet_M>",Mpuli,"</Bullet_M>\n")
write(handle,"<Bullet_E_FromCoil>",Epuli,"</Bullet_E_FromCoil>\n")
write(handle,"<Bullet_E>",Epuli_all,"</Bullet_E>\n")
write(handle,"<Capacitor_E>",EC,"</Capacitor_E>\n")
write(handle,"<Efficiency>",KPD,"</Efficiency>\n")
write(handle,"<Bullet_V>",Vel,"</Bullet_V>\n")
write(handle,"<Bullet_Vmax>",Vmax,"</Bullet_Vmax>\n")
write(handle,"<Data>\n")

```

```

for Scet=1,KC-1 do
write(handle,"<string>")
data1,data2=gsub(T_t[Scet], "%.", ".")
write (handle,data1,"|")
data1,data2=gsub(T_x[Scet], "%.", ".")
write (handle,data1,"|")
data1,data2=gsub(T_I[Scet], "%.", ".")
write (handle,data1,"|")
data1,data2=gsub(T_F[Scet], "%.", ".")
write (handle,data1,"|")
data1,data2=gsub(T_Vel[Scet], "%.", ".")
write (handle,data1,"|")
data1,data2=gsub(T_B[Scet], "%.", ".")
write (handle,data1)
write(handle,"</string>\n")
end
write(handle,"</Data>\n")
write(handle,"</SimulationData>")
closefile(handle)

```

```

remove (Pp .. "/GaussCalc" .. Pid .. ".fem")
remove (Pp .. "/GaussCalc" .. Pid .. ".ans")

```

					IA52.330БАК.005 ПЗ	Лист
Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		